

航空林分材積表に関する研究

今 永 正 明

(山形大学農学部森林経理学研究室)

(昭和47年9月16日受領)

Studies on the Aerial Stand Volume Table

Masaaki IMANAGA

(Laboratory of Forest Management, Faculty of Agriculture, Yamagata University)

目 次

| | |
|----------------------------------|-----|
| まえがき | 58 |
| 緒 論 | 58 |
| 1. 研究目的 | 58 |
| 2. 研究方法および内容 | 59 |
| I. 航空林分材積表に関する従来の研究 | 60 |
| 1. 独立変数が一つの場合 | 60 |
| 2. 独立変数が二つの場合 | 61 |
| 3. 独立変数が三つの場合 | 63 |
| II. 航空林分材積式の検討 | 65 |
| II-1. 概 説 | 65 |
| II-2. 材積式の誘導 | 65 |
| 1. 生態学的基礎に基づく検討 | 65 |
| 2. 単木材積の集合として林分材積をとらえた場合の検討 | 70 |
| II-3. 材積式に関する考察 | 74 |
| 1. 独立因子について | 74 |
| 2. 層化について | 79 |
| III. 材積式の独立因子の測定精度 | 89 |
| III-1. 樹 高 | 89 |
| 1. 単木樹高 | 89 |
| 2. 林分平均樹高 | 92 |
| III-2. 本 数 | 96 |
| 1. 本数が少なく, 写真上で個々の立木の測定が比較的容易な場合 | 96 |
| 2. 本数が多く, 写真上で個々の立木の測定が困難な場合 | 97 |
| IV. 総 括 | 100 |
| V. 飢肥地方スギ人工林航空林分材積表の作成 | 102 |
| V-1. 資 料 | 102 |
| V-2. 航空林分材積表の作成 | 102 |
| V-3. 検 定 | 106 |
| 結 論 | 107 |
| 要 約 | 108 |
| 引用および参考文献 | 109 |
| Summary | 111 |
| 附 表 | 115 |

まえがき

航空林分材積表を作成し、林分材積を写真より直接推定する方法は直接推定法と呼ばれ、諸外国で広く研究されてきた方法である。

わが国においても戦後、航空林分材積表の研究はかなり行なわれた。しかしその実用化はほとんどはかられていないのが現状である。

ところで航空林分材積表の作成には地上調査を伴うが、一たん材積表が作成されると、あとは写真から直接材積が推定される。そのためこの方法は、急峻な山岳林の多いわが国の森林蓄積調査にあたり、地上調査の労力を省くことが出来るという点において、きわめて将来性の高いものと考えることができる。

それにもかかわらず、現在この方法が実用化されていない原因として、材積表作成に統計的手法を要し、写真上での測定に技術を必要とするわりには、材積推定精度が高くないことがあげられよう。

そこで筆者は、写真上で容易に測定され、しかも材積と結びつきの強い因子に基づく高精度な航空林分材積表を見出すことを目的に、この研究を行なった。なお本論文は京都大学審査学位論文としてとりまとめたものである。

本研究の遂行ならびにそのとりまとめにあたり、終始御指導と御鞭撻を賜った京都府立大学大隅真一教授、山形大学北村昌美教授、京都府立大学梶原幹弘助教授、ならびに資料収集にあたり直接、間接に御協力をいただいた多くの方々に対し、心から感謝の意を表する。

緒 論

1. 研究 目 的

石川¹⁾は、わが国の航空写真による蓄積調査研究の経過を3期にわけ、第Ⅰ期を昭和10年～16年の写真判読材積が客観性を持ち得なかった段階、第Ⅱ期を昭和29～40年の判読材積が理論的に客観性を持ち、判読因子の測定が初歩の段階、第Ⅲ期は昭和37年以降の判読因子の測定を高度な装置を用いて計量化しようとする段階である、と述べている。この分類では航空林分材積表の作成は第Ⅱ期に属するものとされ、航空林分材積表が結局は不備であったため、地上調査との併用法を必要としたこと、そして現在はずでに高度な判読器具(濃度測定装置など)により判読精度を高めようとする第Ⅲ期に入ったものとされている。

では簡単な判読器具と航空林分材積表による材積推定の時代は終わったのであろうか。この方法に代わるべきよりよい方法が見出されたのであろうか。

現在、写真濃度測定による材積推定法は研究の緒についたばかりであり、波形解析による材積との結びつきについても必ずしも成果はみられない。しかも濃度測定装置は高価である。一方、ステレオグラム(比較判例写真)は行政機関でその整備を進め、実用化がはかられている。ところがこれを用いる方法は比較目測法であり誤差の評価ができず、判読

者の主観に多く左右されるという欠点を持つ。

また最近、多変量解析の手法が導入され、多くの要因を独立変数とする「スコア材積表」が研究されている。この方法によると独立変数を多くとるだけに、重相関係数は高くなる。しかしこの方法では、材積と必ずしも直接関係のない要因（たとえば地形要因）も、その場合場合に依じて、単に相関が高いといった理由から採用されることになり、理論的、普遍的なものがとらえ難いという欠点が指摘できよう。

このようにみえてくるなら、簡単な判読器具と統計的手法に基づく材積表による材積推定法は決して簡単に放棄されるべきものとは考えられない。むしろ、本当に材積に結びつきの強い数少ない因子を写真上で正確に測定し、材積に結びつけるという従来の航空林分材積表のいき方はより合理的な方法と再評価できよう。

そこで従来の航空林分材積表を検討しなおし、使いやすく、しかも精度の高い航空林分材積表を見出すことは重要な課題となる。ここにこの研究の目的が存在する。

なお本研究では対象とする林分を人工同齢林（おもにスギ）に限った。その理由は、材積推定の必要度は人工林で高く、しかも今まで人工林を対象とする航空林分材積表の研究は比較的行なわれていなかったことによる。

2. 研究方法および内容

航空林分材積表も一般の立木材積表と同様に

(1) 材積表自体が正確なものであること

(2) 材積表構成因子はその測定が容易で、かつ正確に行なわれるものであること

の両条件をかねそえることが要求される。ここで (1) の条件は、材積表作成のもとになる材積式の精度が高い、ということであり、(2) は、独立因子が写真上で容易に、しかも正確に測定されうるものである、という条件を示している。

そこで写真上で測定が容易にしかも正確に行なわれうる因子の中で、林分材積に直接結びつく因子により理論的に林分材積式を誘導することが出来るなら、誘導された材積式は精度が高く、しかも普遍性のあるものとなると考える。この材積式により作成される材積表は望ましい航空林分材積表となろう。

こうした観点に立って本研究を進める。

本論文は5つの部分から構成される。

まずⅠにおいて、従来各地で検討された多くの航空林分材積式を、独立因子の数によって分類し考察する。

Ⅱは本論文の主要部分を構成するものである。Ⅱ-2 において航空林分材積式を誘導する。ここで林分材積公式に基づく場合と、林分を単木の集合としてとらえた場合の2つの立場から林分材積式が誘導される。

その結果、独立因子として樹高と本数を考慮した材積式が導かれるが、その本数の扱いは全く独自のものであり、ここに従来にない航空林分材積式が提示されることになる。

Ⅱ-3 では誘導した材積式について総合的に考察を加える。まずその1において、樹高と本数がいかに重要な因子であるかを相関分析をもとに裏づける。2においては材積式の精度を中心に考察する。ここで本数層化について理論的裏づけを行なう。その検討結果に基づく層化方法によるなら、本材積式がきわめて精度の高い材積式となることが明らかにな

ろう。

Ⅲにおいては前述した(2)の条件が考察される。Ⅲ-1では写真上においても実用上十分な精度で樹高が測定されることを明らかにする。Ⅲ-2においては写真上での本数測定精度を扱う。ここでは主として写真上で本数層の判別について理論的考察を行なう。

Ⅳは本研究の総括である。ここでそれまでの研究成果をとりまとめ、新しい航空林分材積表のあり方を明確にする。さらにここではこの材積表の適用精度についてもふれる。

この総括によって筆者の材積表が従来のものをしのぐ航空林分材積表であることが明白になろう。

最後にⅤにおいて本研究の成果に基づく航空林分材積表を実際に作成し、本研究による材積表の実体を明らかにする。

I. 航空林分材積表に関する従来の研究

1920年代後半に始まった航空林分材積表に関する研究は、その後多くの成果を生んだ。1964年に刊行された Loetsch and Haller²⁾の著書によると、最近15年間に多くの発表がなされたことがわかる。わが国においても1950年代のなかばからこの方面の研究が進んできた。森林調査研究会³⁾は、1965年の著書において1964年までに発表されたこの方面の業績をまとめあげた。ここには25の研究成果が要約されている。また Spurr⁴⁾、中山⁵⁾、谷口⁶⁾などはこの方面ですぐれた成果をあげており、彼等の著書、論文にこの方面の業績が概括されている。そこでこうした資料をもとに従来の研究成果について考察を加えることとする。

航空林分材積表は、写真上で判読可能でしかも材積と結びつきの強い因子と、林分材積の間に回帰式を導き、その林分材積式によって作成されるという手続きをとる。写真上で測定した値で実際の材積を知るためには、独立変数に写真測定値、従属変数に現地実測材積が用いられる。これに対し、独立変数、従属変数ともに地上実測値を用いる場合がある。この場合、通常写真測定値と地上実測値の関係をあらかじめ調べておき、その結果に基づき修正を行なうといった手続きをとる。さらに独立変数の一部は地上実測値、一部は写真測定値を用いる場合もみられる。独立変数に地上実測値を用いたものについて森林調査研究会は空中写真用地上材積表という呼称を与えた。しかしここではこうしたものも総括して航空林分材積表として扱う。

航空林分材積表はこのように写真上で直接林分材積を求めるということを目的としている。したがって林分を単木の集合としてとらえる立場をとらない。そこで直接林分材積と関係の深い因子の選択が重要となる。その場合そうした因子が写真上で測定しうる因子であることがまた必須の条件となる。

この2条件のもとで材積式が考えられるが、その独立変数の種類と数、また結合の形により、従来多くの材積式が考えられてきた。いまそれらを独立変数の数によって整理し考察する。

1. 独立変数が一つの場合

一つの独立変数による林分材積式には通常樹高が用いられる。Ferree⁴⁾は同齢の正常な

立木度を持つ人工林について樹高がよい精度を与えることを指摘した。Spurr⁴⁾ は材積の樹高に対する回帰は曲線を描くことを明らかにした。中山⁵⁾ が発表した

$$V = \frac{aH^2}{b+H}$$

V: ha あたりの林分材積

H: 林分平均樹高

a, b: 定数

はこの関係を満たすものである。愛知地方のスギを対象とする79林分に関して本表による林分材積推定値と実測値を比較した結果について中山は-11%の誤差率であったと報告している。中山は収穫表をもとに航空林分材積式を考えているがこの考え方は注目される。樹高を独立変数とする例は、塚越他³⁾ が広葉樹について発表した。式は

$$V = 25.31 H - 147.7$$

で相関係数は 0.77である。

独立変数に本数 (N) を用いる場合も報告されている。西谷、野口⁷⁾ は高知県のヒノキ人工林の21~40年生に対し

$$V = a + bN$$

式の精度が高いことを報じている。推定の標準誤差の平均材積に対する比率は25~28%である。本数を独立変数とする材積式は北海道の広葉樹でも試みられている³⁾。さらにここでは樹冠疎密度による材積式もみられる。Ferree⁴⁾ は樹冠直径も成熟広葉樹林で考慮されうること述べている。

このように対象に応じて、樹高、本数、樹冠疎密度、樹冠直径がそれぞれ独立変数となりうる事がわかる。しかしスギ、ヒノキなどの人工同齢林を対象とする場合、通常樹高が最も材積と相関が高く、本数がそれにつぐと考えられる。木梨⁸⁾ は九州のスギ人工林(林齢約45年、面積約 20 ha、蓄積約 500 m³/ha 前後)にプロットを設定し、航空写真による材積推定の精度を検討した。そこでは樹高、本数、樹冠直径がとりあげられている。変数の材積に対する効果は上述の順で落ちるといふ。一方写真上での判読精度、正確度は、樹高、直径、本数の順で落ちると指摘した。

2. 独立変数が二つの場合

航空林分材積式として二つの独立変数を用いているものは多い。森林調査研究会のまとめた業績をみても二変数材積式が大部分である。外国でも二変数材積表は多く、とくに樹高と樹冠疎密度を使う場合が一般的である⁴⁾。Gingrich and Meyer は中央ペンシルバニアのオーク林でこうした材積表を検討している。用いた写真は赤外線写真で縮尺は 1:12,000である。93個の 0.2エーカーのプロットが設定された。材積は地上調査により求められている。独立変数として、林分樹高 (H)、樹冠直径 (D)、樹冠疎密度 (C)、が写真上で測定された。林分樹高は 3本の最も高い木の平均として計算された。平均樹冠直径は、3つの最も大きな樹冠の平均として計算された。樹冠疎密度は Moessner の樹冠疎密度計により得られている。

検討の結果得られた式は

$$Y = b_3 X_3 + b_4 X_4$$

Y : 林分材積

X_3 : 樹冠疎密度

$X_4 : X_1 \cdot X_3 / 100$

ここで, X_1 : 林分樹高

b_3, b_4 : 定数

である。これは

$$Y = (b_0 + b_1 X_1) \frac{X_3}{100}$$

より導かれたものである。

ここでのデータをもとに Loetsch and Haller²⁾ は材積式の精度の検討を行なった。その結果はきわめて興味深い。

誤差の大きさは

$$V = f(H)$$

$$V = f(H, C)$$

$$V = f(H, C, D)$$

$$V = f(C, H \times C)$$

の場合ごとに回帰式の残差の分散で示している。得られた値はそれぞれに対し 12959, 12885, 12790, 12825 (いずれも cu. ft/0.2 acre) であった。この平方根が標準誤差になる。この標準誤差をプロットあたりの平均材積 388.28 cu. ft/0.2 acre に対する割合で示すと

$$V = f(H) : 29.32\%$$

$$V = f(H, C) : 29.23\%$$

$$V = f(H, C, D) : 29.13\%$$

$$V = f(C, H \times C) : 29.17\%$$

となる。最後のものが前述した Gingrich and Meyer の式である。この結果は4つの式の残差の百分率標準誤差にほとんど差がないことを示している。このことは、独立変数として樹高のみを用いた一変数材積式で十分、二変数あるいは三変数材積式の精度に近似できることを示している。この点は注目される。

中曽根⁹⁾ は青森でヒバを主とする天然林を対象に樹高 \bar{H} と樹冠直径 \bar{CD} による材積式を発表した。式は

$$V = 17.4 \bar{H} + 74.3 \bar{CD} - 292.9$$

V : 実測材積

\bar{H} : 判読樹高

\bar{CD} : 判読樹冠直径

であり、重相関係数は $R = 0.7503$ である。なおここでは本数も調査対象としたが、材積との相関が低く除かれている。この材積表を適用した結果は、誤差の最大 +11.20%, 最小 +0.07% である。

金谷¹⁰⁾ は茨城、静岡県でスギ、ヒノキを対象に材積式の検討を行なった。式は

$$\text{スギ} : V = a + bN + CH$$

$$\text{ヒノキ} : V = a + bN + CR$$

V : 材積

N: 本数

H: 樹高

R: 樹冠疎密度

を用いている。重相関係数は1つを除いて0.7以上である。谷口は⁵⁾ 奈良県林務課の式として積の形をとる

$$V = 0.775 x^{1.371} y^{0.995}$$

V: 林分材積

x: 平均樹冠直径

y: 平均樹高

をあげている。

また Prodan¹¹⁾ の紹介する I. T. C., Delft の成果もきわめて注目に値するものと考えられる。ここでは 1,700 ha の閉鎖林分に32個の 50×50 m プロットを設定し、つぎの因子を地上で測定した。すなわち13本の最も高い木に基づく上層高、本数、%で示した樹冠閉鎖度、材積である。ここで樹種はヨーロッパアカマツであり、樹高は 14~23 m、林齢 50~75年、閉鎖度45~75%となる。材積は次の方程式で示される。

$$y = 61.88 + 0.027 x_1^3 + 0.12x_2$$

y: 材積 (m³/ha)

x₁: 上層高 (m)

x₂: 立木数

この式は地上調査のデータをもとに計算されている。樹冠閉鎖度と材積との関係は有意でないため回帰式に用いられていない。なお回帰に基づく誤差は絶対値で ±24.35 m³/ha ($\bar{v} = 227.86$ m³/ha), パーセントで10%である。

このように材積式の因子として、樹高、本数が用いられていること、樹冠閉鎖度は用いられていないこと、さらに式が現地調査のデータに基づいて作成されていること、誤差が小さいこと、などいずれも特に注意を払う必要がある。

数多い二変数材積式で共通しているのは、ほとんどの場合独立変数の一つに樹高を用いている点である。このように林分材積式における樹高のウェイトは高い。

3. 独立変数が三つの場合

Moessner⁴⁾ は樹高、樹冠直径、樹冠疎密度による林分材積式を提唱した。彼はアメリカ中央州の広葉樹、ロッキー山脈の針葉樹にこの材積式を適用した。Willingham⁴⁾ はフロリダの大王松について樹高、樹冠疎密度、本数を適用して成果をあげている。Avery⁴⁾ はミシシピーの松と広葉樹について三変数材積式の有効なことを示している。谷口⁶⁾ は北海道の広葉樹を対象に、本数、平均樹冠直径、平均樹高による材積式を適用した。式は

$$V = a + bN + C \bar{CD} + d\bar{H}$$

で表わされる。この式の適用結果として、8.4%の過少推定であったと報告された。

さらに樹高、本数、樹冠直径、樹冠疎密度を使った四変数の材積式も考えられよう。しかし、お互いに関係する因子を重複して使用することは、必ずしも有効ではない。この例についてはすでに述べたとおりである。Spurr⁴⁾ も三つ目の変数を加えることが、必ずしも回帰の標準偏差を実質的に減ずるものでないことを指摘している。

最近電子計算機の利用によって精度の高い材積式をみつける試みが行なわれている。目的は最もよく適合する式をみつけることである。したがってその式は最も少ない偏差(最も高い重相関係数)を持つことが望まれる。この考え方に基づいて試みられた実例をあげる。ここで Pope²⁾ と Avery and Myhre²⁾ の2例を示そう。二つの場合とも9つの独立変数が積と平方の形を含めて検討された、電子計算機は511の可能な材積式を与えたが、その中から最も適合度のよい式が選択された。

Pope の場合、太平洋岸北西部のダグラスファーについてエーカーあたりの立方フィートで粗材積を与える式としてつぎの式を得た。

$$\hat{y} = -179 + 0.9233 x_1 x_2 + 0.0070 x_1 x_2^2 - 0.0086 x_1^2 x_2$$

重相関係数は

$$R = +0.904$$

であり、回帰に関する標準偏差は

$$s_{\hat{y}x_1x_2} = \pm 3777 \text{ cu. ft/acre}$$

あるいは平均材積の29.2%である。表は0.2エーカーの282プロットをもとに作られている。樹幹疎密度 x_1 はくりかえし測定した平均値を用いている。平均樹高 x_2 は地上で各プロットの優勢木、準優勢木を全て測ったものに基づいている。Avery and Myhre は南部アーカンサスでつぎの式を得た。

$$\hat{y} = 939.065 + 1.258 x_1 x_2 + 0.426 x_2^2 - 39.358 x_1 - 34.155 x_2 - 0.007 x_1 x_2^2$$

重相関係数は

$$R = +0.834$$

である。回帰の標準偏差は $\pm 436.6 \text{ cu. ft/acre}$ であった。式は216個の1エーカーのプロットに基づくものである。樹冠疎密度は樹高30フィート以上の木全てに関するものであり、平均樹高 x_2 は各プロットでの3本の最も高い木に関するものである。

さて上述したような各種の材積表が考えられてきた。Loetsch and Haller²⁾によると知られている航空林分材積表は60から282個のプロットに基づいていること。回帰の残差の標準偏差はプロットあたり平均材積の $\pm 29\%$ から $\pm 75\%$ になること。これに対し、米国の地上林分材積表は百分率標準偏差で $\pm 2.5\%$ から $\pm 9.5\%$ の間にある。といった指摘がなされている。

以上航空林分材積表に関する従来の研究について概括した。最後に従来の研究成果に関して若干の指摘を行なう。

i) 航空林分材積表の精度は一般に低い。地上林分材積表の10倍近い偏差がみられる。

ii) 航空林分材積式は最もよく適合することが目的となる。そのため式は最も少ない偏差(最も高い重相関係数)を持つ必要がある。

iii) そうした式は電子計算機により作成が試みられている。

iv) しかし通常みられる大部分の材積式は数個の変数に基づく簡単な和、または積の形をとる。

v) この変数の数は2個のものが多く。アメリカ、カナダでは、樹高と樹冠疎密度がよく用いられる。

vi) 樹高は一般に材積との相関が最も高く、とくに人工同齡林で重要な変数である。

- vii) 人工同齡林では樹高について本数が重要な変数となると考えられる。
- viii) 多くの変数を用いることは必ずしも精度を著しくあげるものではない。

II. 航空林分材積式の検討

II-1. 概 説

航空林分材積表は航空林分材積式をもとに作成される。したがって従来から多くの材積式が検討されてきた。こうした多様な材積式が考えられた原因は、航空林分材積式の考え方にある。

従来、対象林分に応じて、材積と結び付きの強いと考えられる因子と材積との関係の強さを相関係数によってたしかめ、使用因子を選択し、またグラフ上にそれらの関係をプロットすることによって材積式の形を考える、といった方法がとられている¹²⁾。このため、得られる材積式もその場合場合に応じて異なるものとなる。

最近の電子計算機による材積式の決定といった方法も、本質的にはこうした方法の延長上にあるものと考えられる。いわゆる帰納的な方法が従来の研究方法であった。しかしこの方法だけでは普遍的な航空林分材積式を導くことは出来難い。そこで筆者は出来る限り理論的な考察を行ない、その背景のもとでこの方法を用いることを心がけた。対象林分を人工同齡林に限る場合、こうした方法は必ずしも不可能ではないと考える。その理由の一つは、最近人工同齡林の動きについて生態学方面¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾の研究が進み、かなりの知識が得られたことにある。

そこでまず、林分材積がいかなる式であらわされるかを考える。この際、従来より用いられている林分材積を求める公式

$$V = FGH$$

式を検討の材料とする。

I において人工林を対象とした場合、樹高および本数が材積式の独立因子として重要なことを知った。これらの因子と材積の関係もこの式からつかみ得ると考える。

こうした考え方に従って、II-2 において材積式の誘導を論ずる。

II-3 では、誘導された材積式に考察を加え、この材積式のもつ意味を明らかにする。まず II-3 の 1 で、相関分析法により、本材積式の独立因子の重要性を裏づける。さらに II-3 の 2 では、理論的背景のもとに行なう本数層化によって、本材積式が精度的にもきわめて高度なものとなることを明らかにする。

II-2. 材積式の誘導

1. 生態学的基礎に基づく検討

ha あたりの林分材積 V は

$$V = FGH$$

F : 林分形数

G : ha あたり胸高断面面積合計

H : 林分平均樹高

で求まると考えることができる。ここで写真上で測定可能な独立変数はHのみである。Fは一般にHの関数と考えられるから、Gを写真上で測定可能な因子とおきかえることが出来れば、林分材積Vは、写真上で測定され得る因子だけにより求められることになる。そこでGにかわる因子として、haあたりの本数Nをとりあげる。

断面積合計Gと立木本数Nの関係について吉良¹⁶⁾はFig. II-1を描いた。この図で明らかのように、全地上部については収量一定の状態に達しているが、断面積合計は本数が多くなるに従い多くなることがわかる。しかも両者の関係は両対数軸上で直線関係にあり、いわゆるハックスリーの法則¹⁷⁾が成立つものと考えられる。ハックスリーの相対生長式が成立つなら、GとNの関係は

$$G = aN^b$$

式であらわされると考えてよい。

そこで現実のスギ林のデータをもとにまずこの関係を調べる。

ここで資料として、秋田スギ固定試験地に関する調査結果を用いる。これは寺崎他¹⁸⁾の「秋田地方スギ人工林の成長と収穫」に報告されたものである。この資料を用いる理由は、スギ人工林に関して信頼できる多量のデータが集められているからである。

スギの試験地は29ヶ所あり、各地で3個ずつの試験区が設定されている。その各試験区で3～6回の測定が行なわれている。ここではその各回の資料を全て互いに独立したデータとして用いる。なおこの場合、主副林木合計値をデータとした。ここに本数500本/ha以上のもので378個(内、平均樹高10m以上のもの284個)の資料を得た。この資料をもとに以下の検討を行なう。

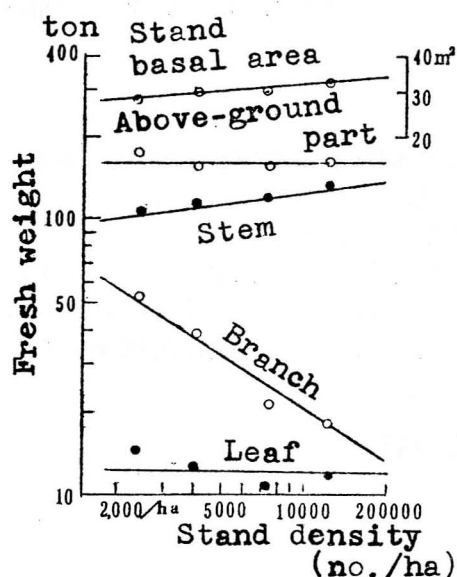


Fig. II-1 Relation between stand basal area and stand density on Y-D effect in the even aged 13 years old *Pinus densiflora* (from Kira¹⁶⁾).

GとNとの関係を両対数軸上にプロットしたものがFig. II-2である。プロットされた点は広く分布するがこれを樹高階(ここでは5mごと)にわけてみる。各層内においても点はちらばるが、その点のちらばりには右上りの一定の関係が認められる。

ここに各樹高階において

$$G = aN^b$$

の関係が無理なくあてはまるものと考えられる。

Fig. II-2について、さらに指摘できる点は、胸高断面積合計に上限が認められる点である。

寺崎他は主林木のデータについて、各樹高階で

$$B = aN^b$$

B: 断面積合計

N: 本数

式をあてはめ、式のa, bを決定してい

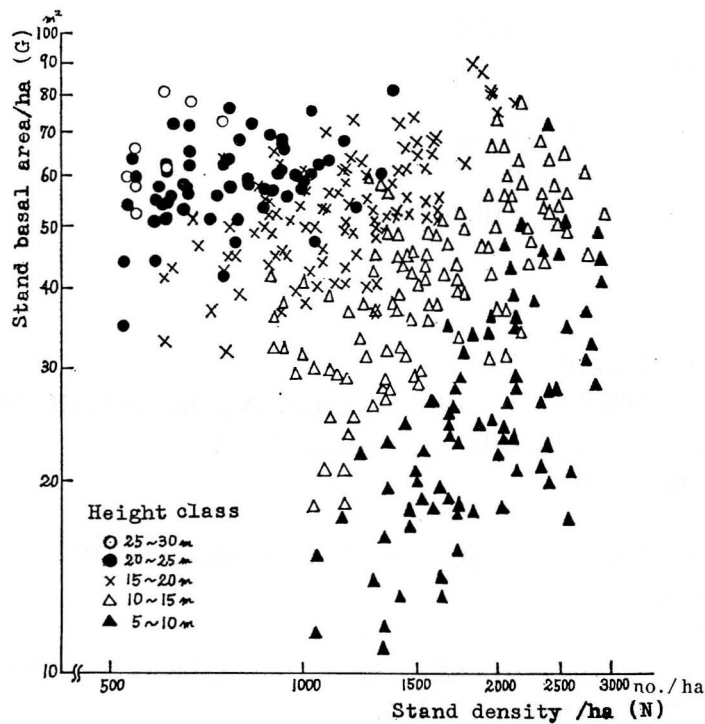


Fig. II-2 Relation between stand density and stand basal area.

る。それによると b の値は

| | | |
|------|---------|------------|
| 平均樹高 | 5~10 m | $b=0.7083$ |
| 平均樹高 | 10~15 m | $b=0.5832$ |
| 平均樹高 | 15~20 m | $b=0.5925$ |
| 平均樹高 | 20~25 m | $b=0.1117$ |

となる。ここで明らかなように、 b の値は平均樹高が高くなるにほぼ従って、小さくなっていくことがわかる。平均樹高が高くなると、 b の値は 0 に近づいていくので

$$b=0$$

なる場合を考えると

$$B=aN^b=a=(\text{Const.})$$

となり、この場合、本数にかかわらず、胸高断面積合計は一定になる。こうした場合が、胸高断面積合計の上限となる。

ところで、樹高が低くなると、直線の傾きは大きくなるが、それらの直線の上端部分は Fig. II-2 でわかるように、ほぼ断面の上限に達しているものと思われる。このことより、樹高がごく低い場合（幼齢時）を除いて、最多密度の森林では胸高断面積が一定となることが知られるが、この点についてはすでに四手井¹³⁾が指摘したとおりである。

さてここでは、こうした特徴を持つ上限部分も含め、 G と N の関係は、各樹高階で

$$G=aN^b$$

でとらえられることがわかった。

そこでこの関係を前述した材積式

$$V = FGH$$

式に用いる。

平均樹高 H_i なる林分の林分材積 V_{Hi} は

$$V_{Hi} = F_{Hi} \cdot a_{Hi} N^{b_{Hi}} \cdot H_i$$

F_{Hi} : 林分平均樹高 H_i なる林分の林分形数

で求められる。

$$F_{Hi} \cdot a_{Hi} = A_{Hi}$$

とおくと

$$V_{Hi} = A_{Hi} N^{b_{Hi}} \cdot H_i$$

ここで、 H を一つ連続的な値をとる変数とみなせば、 A_{Hi} , b_{Hi} は共に H の関数となり、

これらをそれぞれ、 $f_A(H)$, $f_b(H)$ とあらわせば、上式は

$$V = f_A(H) N^{f_b(H)} H$$

となる。

$f_A(H)$, $f_b(H)$ を固定して、その代りに H の指数を 1 に限定せずに H^c とおけば

$$V = aH^c N^b$$

式が導かれる。

この式は後に実例で示すように非常に、適合性の高い式であり、上述した考察からも、航空林分材積式の重要な候補にあげられる。

ところが本式には大きな制約がある。すなわち、本式は式中に N を含むが、本数 N は写真上での測定が必ずしも容易ではない。この点に関して中島¹⁹⁾は「1/20,000 写真上では、ヒノキ人工林において樹冠被覆度80%以上、立木本数 800本/ha 以上の林分では実際の本数に関係なく、ほとんど同じ本数しかよみとれない。スギにおいてもほぼ同様で 1,000本/ha 以上の林分では実際の立木本数がふえていっても、それについて数えられる写真上の本数の値はふえてこない。

原写真の縮尺が 1/10,000~1/5,000 と大きくなれば、本数値は次第に現実の立木とよい相関を示すようになる」と述べている。

そこで N を写真上で正確に測定しなければならないこの式は、ha あたりの本数が少なく、写真上での本数測定が精度高く行ない得る場合を除いて、必ずしも一般的な航空林分材積式とはなり得ない。

ここで観点を換え、本数を層化に用いることを考える。すなわち、1本1本の立木が写真上で正確にとらえ得ないとしても、ある幅に入る本数を一つの層とするなら、その層の判別は写真上で可能であると考えerわけである。ここで本数で層化した各層において、材積 V を H の関数としてとらえる。

$$V = FGH$$

式において、 N をある幅に限定した場合、 F は H の関数として一般に Fig. II-3 で示される²⁰⁾ものの一部を扱うことになり

$$F = \alpha H^\beta$$

式で両者の関係をとらえることができると考えられる。従って、残る G を H の関数であら

わせば、 V は H のみで決まることになる。

先の資料を用い、 G を y 軸に、 H を x 軸にとり、本数層別にプロットしたものが Fig. II-4 である。ここにおいても各層内での点のちらばりに一定の関係が認められ

$$G = mH^l$$

式で、 G と H の関係をとらえることができる。

これらの関係より、 ni 層における材積 V は

$$V = FGH$$

$$= \alpha_{ni} H^{\beta_{ni}} \cdot m_{ni} \cdot H^{l_{ni}} \cdot H$$

$$= \alpha_{ni} \cdot m_{ni} H^{\beta_{ni} + l_{ni} + 1}$$

ここで

$$\alpha_{ni} \cdot m_{ni} = S_{ni}$$

$$\beta_{ni} + l_{ni} + 1 = P_{ni}$$

とおくと

$$V = S_{ni} H^{P_{ni}}$$

式で林分材積が求まることになる。

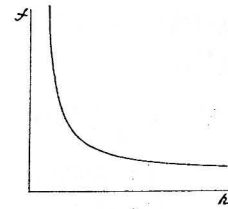


Fig. II-3 The relation of form factor to height (from Yoshida²⁰⁾).

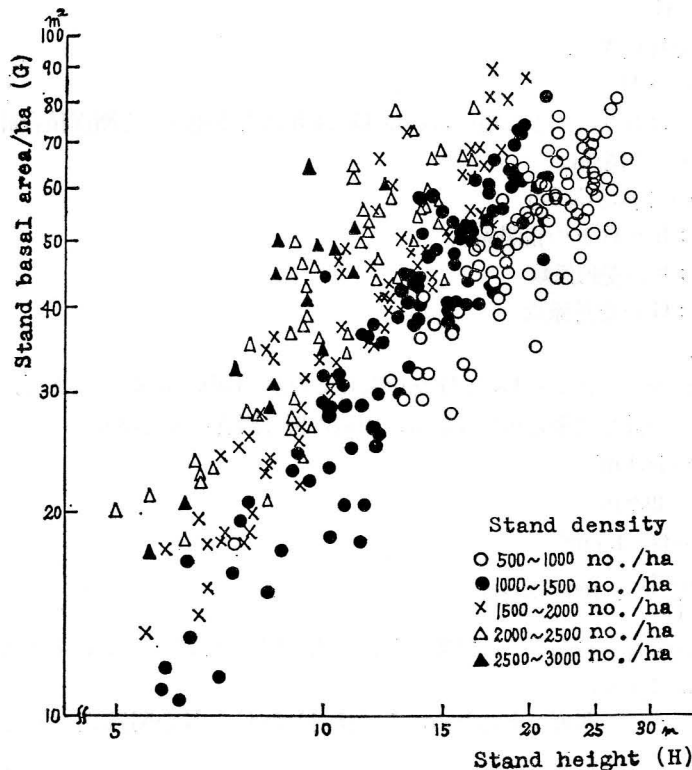


Fig. II-4 Relation between stand height and stand basal area.

2) 単木材積の集合として林分材積をとらえた場合の検討

胸高形数が一林分内では, h , d に関係なくある一定数になると仮定して f とすると, 林分材積 V は

$$V = f \cdot \frac{\pi}{4} \sum h_i d_i^2$$

f : 胸高形数

h_i : 樹高

d_i : 胸高直径

式で求めることができる.

d_i^2 の h_i に対する重みつき平均を $\overline{d_h^2}$ とすると,

$$\overline{d_h^2} = \frac{\sum h_i d_i^2}{\sum h_i}$$

$$\therefore V = f \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \overline{d_h^2} \cdot \sum h_i$$

$$= f \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \overline{d_h^2} \cdot N \cdot \bar{h}$$

ここで

$$\frac{\pi}{4} \cdot \overline{d_h^2} \cdot N = G_h$$

$$\bar{h} = H$$

とおくと, 林分材積 V は

$$V = f \cdot G_h \cdot H$$

式で求まることになり, ここに用いられる G_h は h による重みつき断面積合計となる.

この G_h と G との関係は

$$G_h = G (1 + \rho_{h \cdot G} C_h C_G)$$

ρ : h と G との相関係数

C_h : h の変動係数

C_G : G の変動係数

で表わされる.

ここで現実のデータにより G_h と G を比較したのが Tab. A. II-1 である. ここでは3地域のスギ林での計算結果を示している. 山国の例で両者の差をみると

$$\bar{G} = 48.4 \text{ m}^2$$

$$\overline{G_h} = 49.9 \text{ m}^2$$

$$\overline{G_h} - \bar{G} = 1.5 \text{ m}^2$$

$$\frac{\overline{G_h} - \bar{G}}{\bar{G}} \times 100 = 3 (\%)$$

となる. 同様な計算を行なうと, 飢肥で3%, 雲ヶ畑で5%となった. このように両者のちがいはわずかである.

両者のちがいがこの程度であるため, 1で検討した G と H の関係が, G_h と H との間にも成立つものと考えられる.

すなわち, N をある幅に限定すれば, その層内で

$$G_h = aH^b$$

式が成立つと考えられる。

ここで現地実測資料によって、この関係を検討してみよう。資料として、雲ヶ畑民有林(京都)、飢肥国有林(宮崎)、山国民有林(京都)の3地域での調査資料を用いる。資料収集の実際は後述(Ⅱ-3, 1)する。

両対数軸を持つグラフ上で、x軸に平均樹高、y軸に G_h をとり、各地域について、プロットした結果が、Fig. Ⅱ-5, Fig. Ⅱ-6, Fig. Ⅱ-7である。ここにおいても各本数層で

$$G_h = aH^b$$

式があてはまると考えられる。

そこで各層において、この式をあてはめ、式の a 、 b を決定した。つぎにこの関係を用い、材積 V を導いた。

この場合

$$\begin{aligned} V &= f \cdot G_h \cdot H \\ &= f \cdot aH^b \cdot H \\ &= f \cdot aH^{b+1} \end{aligned}$$

と書ける。ここで

$$f = 0.45$$

と仮定して、材積式を導いた。

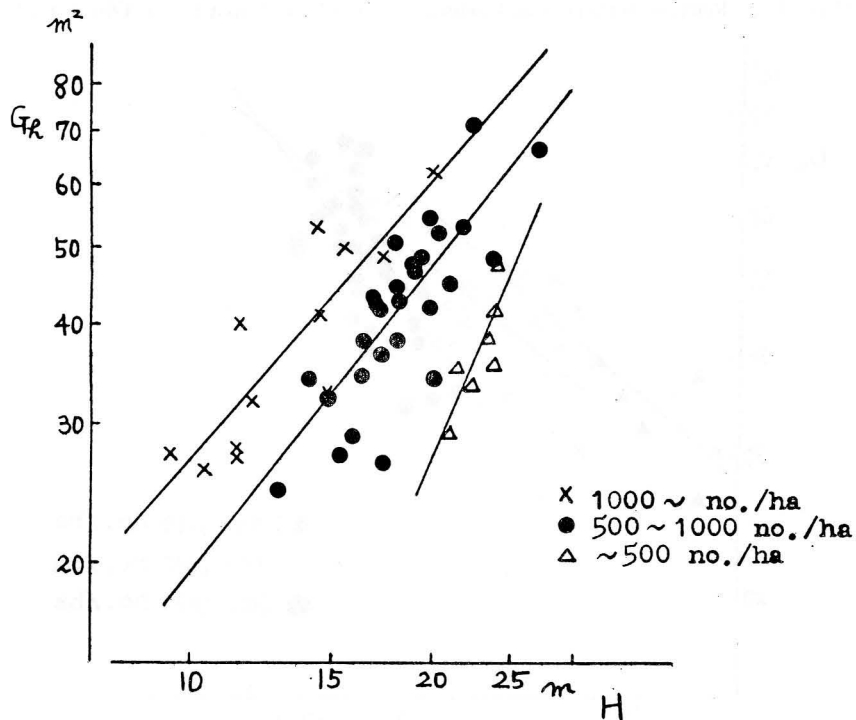
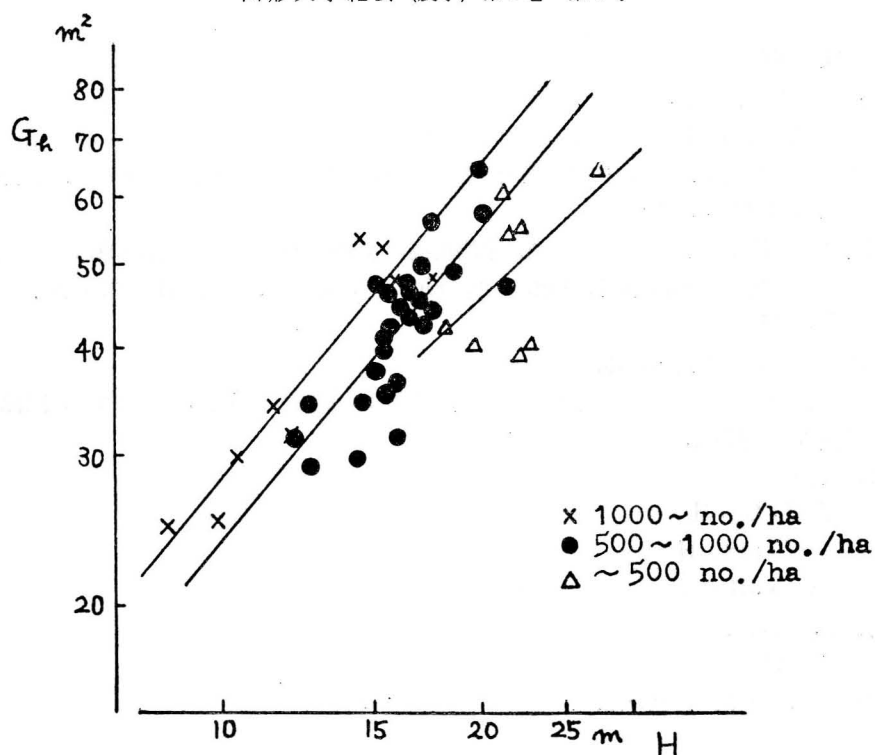
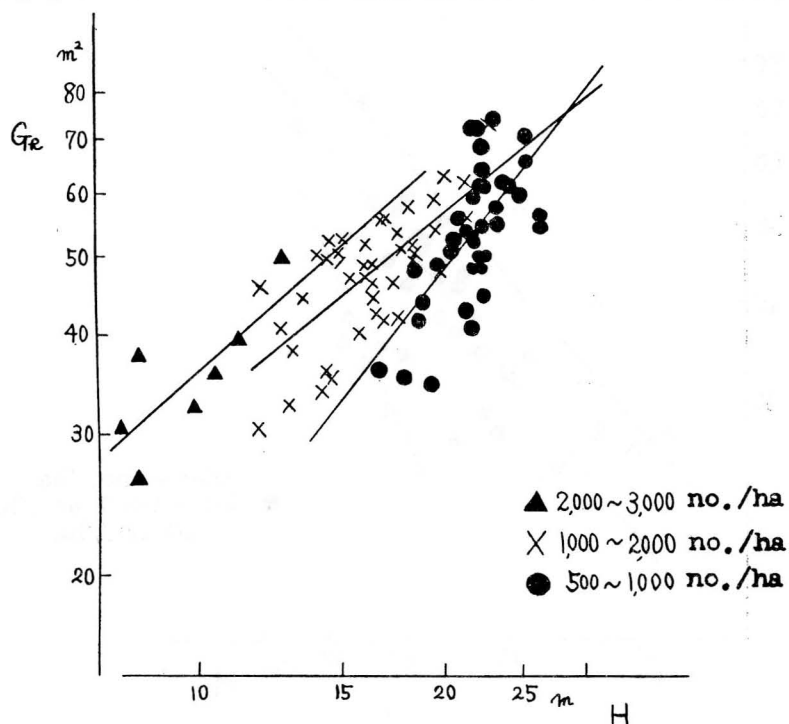


Fig. Ⅱ-5 Relation between stand height and stand basal area G_h in Kumogahata district.

Fig. II-6 Relation between stand height and stand basal area G_h in Obi district.Fig. II-7 Relation between stand height and stand basal area G_h in Yamaguni district.

一方これとは別に、本数で層化した各層で直接

$$V=qH^r$$

式あてはめ、式の q , r を最小二乗法で決定した。前述した過程によって導かれた式を A 式、後者を B 式として Tab. II-1 に両者を示す。A 式と B 式をくらべると、両者の指数は一致せず、A 式の指数は B 式のそれより幾分大きな値となっている。

ところで A 式においては

$$f=0.45$$

と仮定した。しかし現実には、 f の値は H によって変化する。そこで H の値により f の値をかえて (和田²¹⁾ の F 表使用)、A 式から材積を計算した。これを B 式で計算される材積とくらべた結果が Tab. II-2, Tab. II-3, Tab. II-4 である。

これらの表に明らかなように、3 地域とも、両式による計算結果はきわめてよく一致している。

以上、筆者は 2 つの立場から材積式の誘導を論じた。

Tab. II-1 The comparison between the equation A depended on the form factor and the B directly on the allometric relation.

| District | Equation | ~ 500 no./ha | 500 ~ 1000 no./ha | 1000 no./ha ~ |
|------------|----------|----------------------|---------------------|---------------------|
| Kumogahata | A | $V = 0.010 H^{3.37}$ | $V = 0.44 H^{2.29}$ | $V = 0.85 H^{2.16}$ |
| | B | $V = 0.014 H^{3.26}$ | $V = 0.67 H^{2.17}$ | $V = 1.56 H^{1.96}$ |
| Obi | A | $V = 1.27 H^{1.93}$ | $V = 0.64 H^{2.22}$ | $V = 0.78 H^{2.21}$ |
| | B | $V = 2.52 H^{1.68}$ | $V = 1.29 H^{1.98}$ | $V = 1.40 H^{2.03}$ |

| District | Equation | ~ 500 no./ha | 500 ~ 1000 no./ha | 1000 ~ 2000 no./ha | 2000 ~ 3000 no./ha |
|----------|----------|--------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| Yamaguni | A | | $V = 0.257 H^{2.48}$ | $V = 2.12 H^{1.84}$ | $V = 2.26 H^{1.85}$ |
| | B | | $V = 0.374 H^{2.37}$ | $V = 2.41 H^{1.81}$ | $V = 2.40 H^{1.87}$ |

Tab. II-2 The stand volumes calculated by the equations A and B in Kumogahata district.

| Height | Equation | Stand volume m ³ /ha | | |
|--------|-------------|---------------------------------|--------------------|--------------------|
| | | ~ 500 no./ha | 500 ~ 1000 no./ha | 1000 no./ha ~ |
| 10 m | A | m ³ /ha | m ³ /ha | m ³ /ha |
| | (f = 0.524) | — | 101 | 143 |
| 15 m | B | — | 97 | 143 |
| | A | — | 237 | 319 |
| 20 m | (f = 0.485) | — | 234 | 317 |
| | B | — | — | — |
| 25 m | A | 252 | 439 | 569 |
| | (f = 0.465) | 250 | 437 | 558 |
| 30 m | B | — | — | — |
| | A | 521 | 713 | — |
| 35 m | (f = 0.452) | 518 | 709 | — |
| | B | — | — | — |

Tab. II-3 The stand volumes calculated by the equations A and B in Obi district.

| Height | Equation | Stand volume m ³ /ha | | |
|--------|----------------|---------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | | ~ 500 no./ha | 500 ~1000 no./ha | 1000 no./ha~ |
| 10 m | A (f=0.524) | m ³ /ha — | m ³ /ha 125 | m ³ /ha 149 |
| | B | — | 123 | 150 |
| 15 m | A (f=0.485) | 256 | 284 | 338 |
| | B | 241 | 275 | 341 |
| 20 m | A (f=0.465) | 433 | 516 | 613 |
| | B | 391 | 487 | 611 |
| 25 m | A (f=0.452) | 640 | 823 | — |
| | B | 570 | 757 | — |

Tab. II-4 The stand volumes calculated by the equations A and B in Yamaguni district.

| Height | Equation | Stand volume m ³ /ha | | |
|--------|----------------|---------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | | 500 ~1000 no./ha | 1000~2000 no./ha | 2000~3000 no./ha |
| 10 m | A (f=0.524) | m ³ /ha — | m ³ /ha 169 | m ³ /ha 185 |
| | B | — | 156 | 176 |
| 15 m | A (f=0.485) | 227 | 328 | 361 |
| | B | 227 | 325 | 375 |
| 20 m | A (f=0.465) | 443 | 534 | — |
| | B | 448 | 548 | — |
| 25 m | A (f=0.452) | 749 | 782 | — |
| | B | 760 | 820 | — |
| 30 m | A (f=0.444) | 1156 | — | — |
| | B | 1170 | — | — |

ここにこれらの検討結果を総括すると、
本数を層化に用い、各層において

$$V=aH^b$$

なる航空林分材積式を用いる従来にない方法が、きわめて優れたものであるということが
できる。

そこで筆者はこの方法を、新しい航空林分材積式として、ここに提唱する。

II-3. 材積式に関する考察

1. 独立因子について

航空林分材積式の独立因子として、材積と関係が深く、しかも写真上で測定が可能であるという条件から、樹高、樹冠直径、樹冠疎密度、本数の4つの因子があげられる。従来、この4つの因子が対象林分に応じて取捨選択されてきた。その事情の一端はIに述べたとおりである。

ところで対象林分を人工同齡林に限るなら、樹高と本数が主要な因子となる。このことは従来からも知られており、また筆者もこの両因子に基づく航空林分材積式を導いた。そこでここではこの2因子がいかに材積と結びつきが強いかを、従来の検討においてしばしば用いられた相関分析により明らかにする。これによって両因子の、航空林分材積式の独立因子としての重要性が裏付けられる。

ここで資料として筆者らの行なった現地調査結果を用いる。資料は3地域のスギ人工同齡林で収集された。対象地は、京都市郊外の雲ヶ畑民有林、宮崎県日南市郊外の飫肥国有林ならびに京都府下山国民有林である。まず調査の概略を述べる。

(1) 資料の収集

(a) 雲ヶ畑民有林

京都市北区雲ヶ畑地域一帯のスギ林に0.05 haの円形プロット60数個を設定し、現地調査を行なったものから、スギの純林48個を選出した。現地調査はプロット内でつぎの要領によって行なった。

まず胸高直径8 cm以上の林木について輪尺を用いて毎木調査した。この場合、写真上で測定が不可能と考えられる下層木はチェックしておいた。樹高はシュピーゲルレラスコープを用いて10数本の標準木について測定した。この10数本の樹高測定値を平均したものを平均樹高とした。さらに平均樹冠直径を測定した。これはレラスコープにより樹冠直径と胸高直径との比を10数本の標準木について測定しておき、得られた平均胸高直径にその比を乗じるという方法で求めた。

材積はこの地方のスギに適合性の高い、愛知、岐阜の立木材積表（林野庁編）を使用し、て算出した。

調査結果を Tab. A. II-2 に示す。なお先にチェックした下層木の占める割合は、本数で8%、材積で1%であった。

(b) 飫肥国有林

熊本営林局管内飫肥事業区新村担当区に属する国有林のスギ林に、0.08 haの円形プロット39個を設定した。現地調査は以下のとおりである。

各プロットでまず毎木調査を行なった。樹高はシュピーゲルレラスコープを用い、各直径階で3本程度、1プロットで20~30本測定した。平均樹高は各プロット毎に直径階別の樹高を2次の樹高曲線式で求め、本数の重みをつけて算出した。さらにここでは樹冠疎密度を測定した。測定はオプチカルスケアを改良した器具によった。この器具により、目から真上に垂線をたて、その点が樹冠にかかるかどうかを判定した。1プロット内で100点を任意にとり、各位置で上述の判定を行なった。この際、樹冠にかかれれば1、かからない場合0として、その合計値をプロットの樹冠疎密度とした。

材積は昭和36年調整の飫肥地方スギ立木材積表により求めた。調査結果を Tab. A. II-3 に示す。なおこの表にみられるように、この場合も下層木はチェックして区別した。

(c) 山国民有林

京都府北桑田郡京北町山国地域のスギ林で現地調査を行なった100プロットのうち、異常資料を除く87プロットを選択した。ここでプロットは0.1~0.05 haの円形プロットであり、現地において各齢級、各地位にわたるよう設定した。現地調査の要領は飢肥に準じた。ただしここでは樹冠疎密度の測定は行なっていない。調査結果をTab. A. II-4に示す。

以上の資料をもとに材積と各因子の間の相関係数を計算し、材積に対する相関の強さを知ろうとするのがここでの検討である。ところで写真材積表を考える場合、求めるべき全材積に対して写真上で測定可能なものは、各因子の上層木に関する値である。そこで材積と樹高、本数間の相関係数の計算には全材積値と各因子の上層木に基づく値を用いた。ただし山国の資料については、全材積と、下層木も含めた樹高、本数因子の値との関係の強さをみた。

(2) 相関係数

二変数間の相関関係をみるために、まず両者の相関図を作成する。両変数間の関連のあり方が、ほぼ直線関係の場合に、その関連の程度が単純相関係数を計算することにより知られる。そこで相関係数を計算するにあたり、関連の直線性の検討がまず必要である。

ところで筆者はVとHとの関係を

$$V = aH^b$$

式で表わした。このことは両者の関係が対数軸上で直線関係を示すことを表わしている。したがってこうした関係の下では、相関係数の計算は対数値に基づいて行なわれる必要がある。

筆者はこうした関係を考えるが、ここでは一般の直線関係にある場合も考慮し、計算は両者について行なった。計算結果をTab. II-5に示す。

この結果、対数による計算結果の方が材積に対する樹高、本数の相関で高い値を示すことがわかる。また3地域を通じて樹高が高い相関値を示すことは注目される。

ところで林分材積は樹高、本数、樹冠直径などと相関関係にあるが、本数は樹高とも相関関係を持つ。したがって林分材積と樹高との関係を正しくとらえようとする、本数や樹冠直径の影響を除去しなくてはならない。そこでこうした問題をとり扱う場合、単純相

Tab. II-5 Simple correlation coefficients between stand volume and other factors.

| District | Factor | Simple correlation coefficient |
|------------|--------|--------------------------------|
| Kumogahata | rv·H | 0.81** (0.85**) |
| | rv·CD | 0.58** (0.68**) |
| | rv·N | -0.39** (-0.45**) |
| Obi | rv·H | 0.90** (0.92**) |
| | rv·N | -0.59** (-0.61**) |
| | rv·R | -0.12 (-0.05) |
| Yamaguni | rv·H | 0.92** (0.94**) |
| | rv·N | -0.69** (-0.74**) |

Note. 1. V : Volume H : Height N : Stand density (no./ha) CD : Crown diameter
R : Crown closure

2. Figures in parentheses are depended on the logarithmic values.

3. ** Significant, 1 % level.

関係数より、偏相関係数による方がより望ましいと考えられる。

多変数間の回帰関係が

$$X_1 = a + bX_2 + cX_3 + dX_4$$

で与えられる場合、 X_1 と X_2 , X_1 と X_3 …… などの相関関係は第 2 次偏相関係数で与えられる。計算はまず 4 種の変数間の単純相関係数 r_{12} , r_{13} …… を計算しておき、次式によって第 2 次偏相関係数を計算する。

$$r_{12 \cdot 34} = \frac{-R_{12}}{\sqrt{R_{11} R_{22}}}$$

$$r_{13 \cdot 24} = \frac{-R_{13}}{\sqrt{R_{11} R_{33}}}$$

$$r_{14 \cdot 23} = \frac{-R_{14}}{\sqrt{R_{11} R_{44}}}$$

ここで

$$R = \begin{vmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} \end{vmatrix}$$

であり、 R_{ij} は r_{ij} の余因数である。たとえば R_{11} , R_{12} は r_{11} および r_{12} の余因数で

$$R_{11} = \begin{vmatrix} 1 & r_{23} & r_{24} \\ r_{32} & 1 & r_{34} \\ r_{42} & r_{43} & 1 \end{vmatrix}$$

$$-R_{12} = \begin{vmatrix} r_{21} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & 1 & r_{34} \\ r_{41} & r_{43} & 1 \end{vmatrix}$$

である。

雲ヶ畑と飢肥では林分材積と各因子間の第 2 次偏相関係数を計算した。山国については、材積と樹高、本数間の第 1 次偏相関係数を計算した。この場合、回帰関係を

$$X_1 = a + bX_2 + cX_3$$

で与えられるとすると、偏相関係数は次式で計算される。

$$r_{12 \cdot 3} = \frac{r_{12} - r_{13} r_{23}}{\sqrt{(1 - r_{13}^2)(1 - r_{23}^2)}}$$

$$r_{13 \cdot 2} = \frac{r_{13} - r_{12} r_{23}}{\sqrt{(1 - r_{12}^2)(1 - r_{23}^2)}}$$

計算結果を Tab. II-6 に示す。

以上の相関係数の計算結果から、つぎの諸点の指摘が可能である。

(i) 林分平均樹高は、3 地域において単純相関係数、偏相関係数ともに林分材積と最も高い相関値を示し、相関係数の有意性の検定を行なうと高度に有意（有意水準 1%）である。

(ii) haあたりの本数は、単純相関係数では樹高、樹冠直径につぐが、偏相関係数をと

Tab. II-6 Partial correlation coefficients between stand volume and other factors.

| District | Factor | Partial correlation coefficient |
|------------|---------|---------------------------------|
| Kumogahata | IVH·NCD | 0.81** (0.91**) |
| | IVN·HCD | 0.54** (0.82**) |
| | IVCD·HN | -0.11 (0.17) |
| Obi | IVH·NR | 0.92** (0.94**) |
| | IVN·HR | 0.63** (0.70**) |
| | IVR·NH | 0.15 (-0.08) |
| Yamaguni | IVH·N | 0.90** (0.92**) |
| | IVN·H | 0.57** (0.65**) |

Note. 1. V : Volume H : Height N : Stand density (no./ha) CD : Crown diameter
R : Crown closure
2. Figures in parentheses are depended on the logarithmic values.
3. ** Significant, 1 % level

ると樹高について林分材積と高い相関関係を示し、3地域とも相関係数は高度に有意(有意水準1%)である。

(iii) 樹冠直径は、単純相関係数ではある程度高い値であるが、偏相関係数をとると非常に低い値となる。すなわち樹高と本数を固定すると樹冠直径は林分材積とほとんど関係を持たない。

(iv) 樹冠疎密度は、単純相関係数、偏相関係数ともに低く、林分材積とほとんど関係を持たない。

(v) 対数による計算結果は、材積と樹高、材積と本数に関する相関係数で、真数による場合よりも高い相関値を示す。

以上の結果から、林分材積と最も強い関係を持つものは樹高であり、それについて立木本数であることがわかる。

ここで用いた資料は3地域に限定され、また各地域での測定項目も異なっている。しかし、一応考えられる因子はもうらし、また国有林、民有林、さらに飼肥といった特殊な地域も含まれている。したがって上述した両因子が材積と強い関係にある事実は一般的に認められると考えるが、さらに中島²²⁾が行なったいくつかの例を参考にする。

中島はスギ、ヒノキ、アカマツ、カラマツなどについていくつかの地域で材積と各因子間の偏相関係数を求めている。Tab. II-7 に4樹種について計算された偏相関係数値を示す。この表にも明らかなように、樹高は、材積と高い相関関係を持つことがわかる。この関係は樹種、地域を問わない。本数はスギについて低い相関しか見られない地域もある。しかしヒノキでは非常に高い。樹冠疎密度は高い場合、低い場合、いろいろである。樹冠直径は一般にあまり高い相関を示さない。

このように同じ人工林でも、樹種、生育条件、施業方法などによって、林分材積に対する各因子の影響の強さは異なる。しかしそうした中であっても、樹高が材積と高い相関関係にあることは明らかである。さらに立木本数、樹冠疎密度などは高い相関を持つ場合が多い。ただ樹冠疎密度は、飼肥のスギ、長野のヒノキ(人)、新潟のアカマツなどでみられるように、材積との相関に異常に低い場合がみられ、安定した因子とは考え難い。

Tab. Ⅱ-7 Partial correlation coefficients between stand volume and other factors (from Nakajima²⁹⁾).

| Species | District | Height | Stand density | Crown closure | Crown diameter |
|-----------------------------|--------------|--------|---------------|---------------|----------------|
| <i>Cryptomeria japonica</i> | Amagi (A) | 0.88 | 0.54 | 0.72 | 0.47 |
| | Maebashi (A) | 0.65 | 0.25 | 0.56 | 0.44 |
| | Niigata (A) | 0.65 | 0.25 | 0.56 | — |
| | Kanto (A) | 0.75 | 0.55 | 0.25 | — |
| | Shizuoka (A) | 0.88 | 0.54 | 0.72 | — |
| <i>Chamaecyparis obtusa</i> | Nagano (A) | 0.79 | 0.71 | 0.04 | 0.56 |
| | Nagano (N) | 0.81 | 0.88 | 0.48 | 0.22 |
| <i>Pinus densiflora</i> | Niigata (A) | 0.76 | 0.50 | 0.17 | — |
| <i>Larix leptolepis</i> | Nagano (A) | 0.79 | 0.45 | 0.71 | — |

Note. A : Artificial forest N : Natural forest

Tab. Ⅱ-8 The regression equations and the percentage of standard errors of residuals.

| No. | Regression equation | Percentage of standard errors of residuals |
|-------|--|--|
| 1 | $V = 469.68 - 0.12100 N$ | 36.3% |
| 2 | $V = 10.30 + 143.22 CD$ | 32.2 |
| 3 | $V = -139.62 + 27.90 H$ | 23.0 |
| 4 | $V = -116.74 + 33.81 H - 52.68 CD$ | 22.8 |
| 5 | $V = 6.424 H^{1.3904}$ | 22.7 |
| 6 | $V = -504.95 + 40.65 H + 0.1515 N$ | 19.4 |
| 7 | $V = 0.00464 H^{2.3573} N^{0.66413}$ | 12.4 |
| 8 (a) | 1000 no./ha~ $V = 2.161 H^{1.8535}$ | 15.5 |
| (b) | 750~1000 no./ha $V = 0.1970 H^{2.6202}$ | 10.4 |
| (c) | 500~750 no./ha $V = 0.4363 H^{2.2750}$ | 12.4 |
| (d) | ~500 no./ha $V = 0.01404 H^{3.2689}$ | 10.2 |

以上の検討により、樹高、本数が林分材積と強い結びつきを持つことが明らかになった。この事実からも、両因子が航空林分材積式の独立因子としていかに重要であるかが裏付けられたことになる。

2. 層化について

本研究の目的は、使いやすさを備えた精度の高い航空林分材積表を見出すことにある。

したがって先に誘導された材積式がこの条件を欠くなら、望ましい航空林分材積式とはなり得ない。ここに材積式の精度が問題となる。

筆者の材積式がこの点において十分期待にこたえ得るものであることをまず明らかにする。

Tab. II-8はTab. A. II-2に示した雲ヶ畑スギ林の現地調査結果をもとに、いくつかの材積式を作成し、それらの式の精度をみたものである²³⁾。ここで式の形は和の形と積の形を用い、独立因子は一つの場合と二つの場合を試みた。

ここで回帰式の定数、係数ならびに式の精度を示す回帰式の残差の百分率標準誤差はつぎのように計算される。

いま一変数材積式を考える場合

$$\hat{y} = a + bx$$

式を用いる。ここで

$$a = \bar{y} - b\bar{x}$$

$$b = \frac{S_{xy}}{S_x^2}$$

$$s^2_{y \cdot x} = \frac{1}{n-2}(S_y^2 - b \cdot S_{xy})$$

で計算され、残差の百分率標準誤差は

$$\frac{s_{y \cdot x}}{\bar{y}} \times 100 (\%)$$

で求められる。

二変数材積式を考えると

$$\hat{y} = a + bx + cz$$

式を用いて

$$a = \bar{y} - b\bar{x} - c\bar{z}$$

$$b = \frac{S_{xy}S_z^2 - S_{xz}S_{zy}}{S_x^2S_z^2 - (S_{xz})^2}$$

$$c = \frac{S_x^2S_{zy} - S_{xz}S_{xy}}{S_x^2S_z^2 - (S_{xz})^2}$$

$$s^2_{y \cdot xz} = \frac{1}{n-3}(S_y^2 - b \cdot S_{xy} - c \cdot S_{zy})$$

残差の百分率標準誤差は

$$\frac{s_{y \cdot xz}}{\bar{y}} \times 100 (\%)$$

となる。

なお式が対数で直線を示す

$$\hat{y} = ax^b$$

あるいは

$$\hat{y} = ax^b z^c$$

の場合は、対数変換して

$$\log \hat{y} = \log a + b \log x$$

$$\log \hat{y} = \log a + b \log x + c \log z$$

となり

$$\hat{Y} = a' + bX$$

$$\hat{Y} = a' + bX + CZ$$

の形に書きかえられる。ここで上述した計算式が適用出来る。

ただし対数計算の場合、補正が必要である。ここでは Meyer の修正係数

$$f = 10^{1.1513\sigma^2}$$

により補正した。

またここで対数に変換して求めた材積式と変換しないで求めた材積式との精度を比較することが必要である。

このため、対数による残差の標準誤差を s として、材積の残差の百分率誤差を

$$s_v(\%) = 100(10^s - 1)$$

で求めた。この s_v と、対数交換しない場合の、 $s_{y \cdot x}$ をもとした百分率誤差が比較される²⁴⁾。

こうした手続により計算された結果が Tab. II-8 である。この表よりつぎの諸点が明らかである。

まず

$$V = aH^b N^c$$

式の誤差率が 12.4% と著しく小さく、この式が精度的にきわめて優れていることがあげられる。同じ二変数材積式でありながら、 H と CD を和の形で結合した式の誤差率は 22.8% に達し、この式の 2 倍近い誤差率となっている。このように式の精度からみても、先に筆者が誘導したこの式の優れていることは明らかである。

つぎに顕著な点は、樹高を用いた材積式の精度が高い事実である。一変数材積式で 20% 台の誤差率となるものは独立因子に樹高を用いる場合のみである。しかし樹高因子だけでは 20% 以下の誤差率にはならない。

表中の No. 8 は本数による層化を考慮した場合である。

ここで明らかのように、各層で 10 数% の誤差率となり、これらの値は、層化しない場合の

$$V = aH^b N^c$$

式の誤差率にほぼ等しい。

このように本数により層化し、各層において

$$V = aH^b$$

式をあてはめるという筆者の方法は、精度的にもきわめて優れた方法であることがわかる。

ところで層化が材積式の精度をあげる点で非常に有効であることが判明した。つぎにいかなる層化方法が材積式の精度を高める上で効果的であるかについて検討する。

この層化を考える場合の鍵となるものはロジスチック理論に基づく逆数式である。

安藤¹⁴⁾は ha あたりの本数と林分材積の間に樹高階ごとに逆数式をあてはめ、いわゆる林分密度管理図を作成した。ここで用いられている逆数式は理論的に誘導されたものである。この逆数式がここで層化を考える指針となる。

いまこの逆数式をとりあげる。式は

$$\frac{1}{V} = a + b \left(-\frac{1}{N} \right) \dots\dots\dots(1)$$

あるいは

$$V = \frac{N}{aN+b} \dots\dots\dots(2)$$

で示される. ここで (2) 式を変形すると

$$\left(V - \frac{1}{a} \right) = - \frac{\frac{b}{a^2}}{\left(N + \frac{b}{a} \right)} \dots\dots\dots(3)$$

式が導かれる.

(3) 式は

$$V = - \frac{\frac{b}{a^2}}{N} \dots\dots\dots(4)$$

なる双曲線を V の正方向に $\frac{1}{a}$, N の負方向に $-\frac{b}{a}$, 平行移動したものである. したがって逆数式は双曲線の形をなすことがわかる. 安藤は多くの資料をもとに式の a , b の値を決定している.

ここでスギ全国の例について, 安藤の決定した a , b の値を利用する. この値に基づく逆数式を普通軸のグラフ上に描いた.

いま樹高 10 m, 20 m, 30 m の場合についてこの関係を示したのが Fig. II-8 である. 図には参考のため, 漸近線ならびに曲線のマイナス部分も書入れてある.

このグラフより, つぎの 2 点を読みとることが可能である.

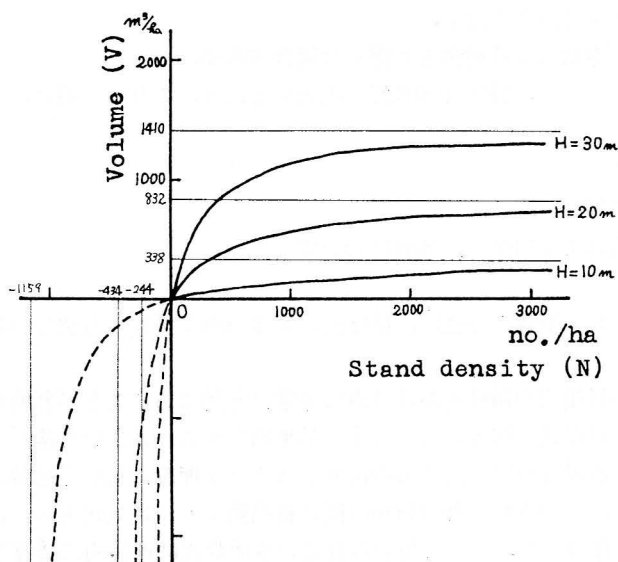


Fig. II-8 Relation between stand volume and stand density depended on the reciprocal equation.

(i) 各樹高において、曲線の曲率は本数の少ない部分で大きく、本数の多い部分で小さい。

(ii) 同一本数層では、樹高が高いものほど曲線の曲率は大きい。

これらの点は双曲線のもつ性質からも明らかである。

すなわち双曲線は、形をあらわす $\frac{b}{a^2}$ の値と、両漸近線 $\frac{1}{a}$, $-\frac{b}{a}$ によって規定される。

このため、この3つの値を知ることにより、x軸のプラス部分に現われる双曲線の曲率についても判断出来る。

ここでこれら3つの値を計算すると Tab. II-9 の通りである。

ここでスギ全国の例についてみると、各樹高における $\frac{b}{a^2}$ の値は

$$39 \times 10^4$$

$$36 \times 10^4$$

$$34 \times 10^4$$

となる。このことは曲線の形自体あまり差がないことを示している。これに対して漸近線を示す $\frac{1}{a}$, $-\frac{a}{b}$ の値は、各樹高に応じて著しくその値を異にする。そのためx軸の正の部分に現われる曲線の部分は、上述の特色をもつ曲率部分となる。

ところでこの事実は、層化を考える貴重なヒントを与えるものと考え、さらに安藤の資料をもとに検討を進めた。

スギ全国の場合の、10 m, 20 m, 24 m の曲線を取りあげ、それらの曲線が本数 200 本/ha, 500本/ha, 1,000本/ha, と交わる点の材積を求めたのが Tab. II-10 である。() 内の値は両材積の差であり、パーセントはその差を両材積の中央値でわったものである。

Tab. II-9 Characteristic values of the reciprocal equation.

| Species | (District) | Height | $\frac{1}{a}$ | $-\frac{b}{a}$ | $\frac{b}{a^2}$ |
|-----------------------------|------------------|--------|---------------|----------------|-----------------|
| <i>Cryptomeria japonica</i> | (All district) | 10 m | 338 | -1159 | 391296 |
| | | 20 m | 832 | - 434 | 360950 |
| | | 30 m | 1410 | - 244 | 344738 |
| <i>Cryptomeria japonica</i> | (Akita district) | 10 m | 447 | -2508 | 1121467 |
| | | 20 m | 961 | - 775 | 744856 |
| | | 26 m | 1284 | - 497 | 638431 |
| <i>Chamaecyparis obtusa</i> | (All district) | 6 m | 174 | -4423 | 768277 |
| | | 10 m | 323 | -1534 | 496101 |
| | | 16 m | 572 | - 579 | 331586 |
| | | 20 m | 751 | - 365 | 274046 |
| <i>Pinus densiflora</i> | (All district) | 6 m | 124 | -3799 | 470582 |
| | | 10 m | 233 | -1238 | 287994 |
| | | 20 m | 547 | - 270 | 147884 |
| | | 24 m | 685 | - 181 | 124010 |
| <i>Larix leptolepis</i> | (All district) | 6 m | 119 | -2472 | 295067 |
| | | 10 m | 228 | -1382 | 315424 |
| | | 20 m | 550 | - 627 | 344921 |
| | | 26 m | 768 | - 465 | 356874 |

Tab. II-10 Stand volumes calculated by the reciprocal equation.

| Stand height no./ha | 10 m | 20 m | 24 m |
|------------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| 200 本 | 50 m ³ | 263 m ³ | 394 m ³ |
| (300) | (52) (68%) | (182) (51%) | (238) (46%) |
| 500 | 102 | 445 | 632 |
| (500) | (54) (42%) | (135) (26%) | (158) (22%) |
| 1000 | 156 | 580 | 790 |
| (1000) | (58) (31%) | (104) (16%) | (113) (13%) |
| 2000 | 214 | 684 | 903 |

まず樹高 10 m をとりあげる。() 内の数値は52, 54, 58となり, ほとんど差はみられない. このことは平均樹高 10 m の林分では本数が 500 本から 200本になるのと, 2,000本から1,000本になるのと, 材積に与える変化量はほとんどかわらないことを示している. 樹高が 20 m, 24 m になるに従い, 本数の少ない部分の 300 本の差が, 本数の多い部分の1000本の差以上の影響を材積に与えることが明白である.

ところで現実の林分にあつては, 10m で本数が 200~500本/ha といった林分は異常林分であろう. 現実によくあらわれる場合としてつぎのような場合を想定する.

いま仮に, 樹高 10m のものは 1,000~2,000本/ha の範囲に分布し, 樹高 20m のものは 500~1,000本/ha の範囲に分布し, 樹高 24 m のものは 200~500本/ha の範囲に分布するものとする. この場合, 各層内の材積の変化量を一致させるためには, 500~1,000本/ha 層をさらに2層化し, 200~500本/ha 層は4層化しなければならない. これを量でなく, 率でみると率を一致させるには, 200~500本/ha 層をやや狭くする程度の修正でよい.

こうした検討をさらに進めれば, 同じ層内でも樹高の高いところでは, 低いものにくらべ層の幅を狭くしなければならないことになる. しかし現実にはそこまでの操作ははんざつであり, 不要と考える.

したがって, 各層内における材積の変化量 (率) を等しくするためには, 層の幅は本数の多いところで広く, 少ないところでは狭くしなければならないことが判明した.

そこで筆者の材積式では, 本数層化はこの原則に基づいて行なうこととする. この層化方式は後述 (III-2) するように, 写真上での測定面からみても, きわめて望ましい層化方法である.

ここで本層化方法が合理的なものであることが明らかとなったが, さらに実例に基づき, 本層化方法と材積式の精度との関係を論ずる.

資料として, 熊本スギ収穫表作成のため収集された現地調査資料²⁵⁾76個を用いる. この資料をもとに, 層別, 材積式別に式の精度をみたものが Tab. II-11 である.

まず材積式として

$$V=aH^b$$

式を用い, 層化を考える筆者の方法を取り上げる. ここで層化を行なわないなら, 材積式の誤差は 26.7% と非常に大きな値となる. そのため層化が考えられるが, ここで5層化の場合が注目される.

Tab. II-11 The standard deviations about regression calculated by the data of the yield table of *cryptomeria japonica* in Kumamoto district.

| Number of classes | Class | Number of plots | $V=aH^b$ | $V=a+bH$ | $V=aH^bN^c$ | $V=a+bH+cN$ |
|-------------------|-----------|-----------------|----------|----------|-------------|-------------|
| | no./ha | | % | % | % | % |
| 5 | ~ 500 | 15 | 19.8 | 25.3 | 14.1 | 17.9 |
| | 500~1000 | 11 | 17.7 | 19.6 | 14.3 | 15.1 |
| | 1000~1500 | 24 | 14.6 | 13.8 | 13.6 | 12.9 |
| | 1500~2000 | 12 | 8.4 | 8.5 | 8.6 | 8.5 |
| | 2000~4000 | 14 | 15.5 | 9.1 | 13.0 | 8.3 |
| 3 | ~1000 | 26 | 21.5 | 28.4 | 13.2 | 19.1 |
| | 1000~2000 | 36 | 15.1 | 14.7 | 12.9 | 12.4 |
| | 2000~4000 | 14 | 15.5 | 9.1 | 13.0 | 8.3 |
| 2 | ~1000 | 26 | 21.5 | 28.4 | 13.2 | 19.1 |
| | 1000~4000 | 50 | 18.2 | 18.0 | 14.1 | 13.7 |
| 1 | ~4000 | 76 | 26.7 | 30.4 | 14.1 | 27.9 |

Note. The figures are the percentage of standard errors of residuals.

ここでは2,000~4,000本/ha層を除き、500本を単位とする層化が行なわれている。この4つの層において誤差率の大きさをみると顕著な一定の関係が認められる。すなわち、層の幅は同じであるにもかかわらず、本数の多い層ほど誤差率が下がっている。このことは、前述の検討を実証しているものと考えてよい。

ここにおいて、各層の誤差率を等しくするためには、本数の多い層では層の幅を広く、少ない層では、層の幅を狭くすればよいことが裏づけられた。こうした観点に基づき Tab. II-11 の2層化、3層化は行なわれている。

つぎに

$$V=a+bH+cN$$

式をとりあげる。この式は同じ二変数材積式でありながら

$$V=aH^bN^c$$

式にくらべると著しく精度が低い。層化しない場合、後者の誤差率が14.1%であるのに対し、この式では27.9%となり、2倍の誤差率を示している。さらに一変数材積式

$$V=aH^b$$

式にくらべても、精度的にほとんど差がない。このため、この式は航空林分材積式になり得ないと考えられる。

つぎに

$$V=aH^bN^c$$

式である。表に明らかなように、この式の精度は著しく高い。層化しない場合

$$V=aH^b$$

式にくらべ、その誤差率はおよそ半分である。ここで層化を行なっても、この式に対して、層化の効果は著しいものではない。ただ本数の少ない層では、他の式の精度が低いいため、本式を用いることはきわめて有効である。

この点について、さらに相関分析によって確かめよう。

Tab. II-12 は、この目的のため相関係数を計算したものである。相関係数は真数により計算がなされた。本来対数による計算が必要と考えるが、本検討の目的には、前者で代用が可能であると判断した。

表においてまず単純相関係数をみる。ここで樹高の材積に対する相関の強さが特徴的である。本数の少ない層のいくつかを除いて、この値は 0.9 を越える。これに対し、本数と材積の相関はそれほど著しくない。

偏相関係数をみると、本数と材積間に高い相関がみられる場合がある。例えば羽黒山の 500~1,000 本/ha 層、熊本の ~500 本/ha 層などがその例である。その他についても、本

Tab. II-12 Correlation coefficients between stand volume and other factors.

| District | Class | Number of plots | Simple correlation coefficient | | Partial correlation coefficient | | Multiple correlation coefficient |
|--|--------------------|-----------------|--------------------------------|----------|---------------------------------|------------------|----------------------------------|
| | | | r_{VH} | r_{VN} | $r_{VH \cdot N}$ | $r_{VN \cdot H}$ | $R_{V \cdot HN}$ |
| Haguro (Yamagata) | no./ha 500~1000 | 22 | 0.82 | 0.07 | 0.92 | 0.74 | 0.92 |
| | 1000~2000 | 33 | 0.88 | -0.33 | 0.88 | 0.35 | 0.89 |
| Akita (from permanent sample plot ¹⁸⁾) | 500~1000 | 109 | 0.94 | -0.25 | 0.94 | 0.27 | 0.94 |
| | 1000~1500 | 127 | 0.95 | -0.09 | 0.95 | 0.39 | 0.96 |
| | 1500~2000 | 73 | 0.95 | -0.08 | 0.96 | 0.50 | 0.96 |
| | 2000~2500 | 52 | 0.95 | 0.04 | 0.95 | 0.06 | 0.95 |
| | 2500~3000 | 17 | 0.93 | -0.10 | 0.94 | -0.02 | 0.94 |
| Yamaguni (Kyoto) | 500~1000 | 38 | 0.83 | -0.23 | 0.86 | 0.46 | 0.87 |
| | 1000~2000 | 42 | 0.93 | -0.34 | 0.96 | 0.69 | 0.96 |
| | 2000~3000 | 7 | 0.95 | -0.49 | 0.94 | 0.33 | 0.95 |
| Kumogahata (Kyoto) | 300~ 500 | 7 | 0.88 | 0.31 | 0.91 | 0.57 | 0.92 |
| | 500~1000 | 29 | 0.92 | -0.18 | 0.95 | 0.64 | 0.95 |
| | 1000~2000 | 11 | 0.94 | -0.33 | 0.96 | 0.65 | 0.97 |
| Obi (Miyazaki) | 200~ 500 | 15 | 0.68 | -0.31 | 0.73 | 0.45 | 0.76 |
| | 500~1000 | 54 | 0.91 | -0.47 | 0.89 | 0.24 | 0.91 |
| | 1000~1700 | 22 | 0.95 | -0.39 | 0.95 | -0.02 | 0.95 |
| Kumamoto (from yield table ²⁵⁾) | ~ 500 | 15 | 0.85 | 0.31 | 0.93 | 0.73 | 0.93 |
| | 500~1000 | 11 | 0.92 | -0.40 | 0.95 | 0.68 | 0.96 |
| | 1000~1500 | 24 | 0.95 | 0.13 | 0.96 | 0.41 | 0.96 |
| | 1500~2000 | 12 | 0.97 | -0.74 | 0.93 | -0.33 | 0.97 |
| | 2000~4000 | 14 | 0.99 | -0.68 | 0.98 | 0.49 | 0.99 |
| | ~1000 | 26 | 0.85 | -0.38 | 0.92 | 0.75 | 0.94 |
| | 1000~2000 | 36 | 0.94 | -0.30 | 0.96 | 0.55 | 0.96 |
| | ~1000 | 26 | 0.85 | -0.38 | 0.92 | 0.75 | 0.94 |
| | 1000~4000 | 50 | 0.95 | -0.64 | 0.95 | 0.66 | 0.97 |
| | ~4000 | 76 | 0.88 | -0.62 | 0.83 | 0.41 | 0.90 |

数の少ない層で、単純相関係数より大きな値となっている。

樹高と材積の関係は、単純相関係数よりさらに強い関係を示す。

こうした事実より、本数の多い層では、樹高のみによっても材積が十分精度高くあらわされうるものと考えてよい。これ対し、本数が1,000本/ha未満の層についてみると、樹高に本数を加えることにより精度が一層高くなることがわかる。この関係は重相関係数に端的にあらわれている。たとえば羽黒山の～1,000本/ha 層、雲ヶ畑の～500本/ha 層、熊本の～500本/ha 層などにおいて、本数を加えることにより重相関係数が0.9を越えてくる。

このような相関分析の結果からも、本数の少ない層で本数を加えることの有効性は明らかとなった。

Tab. II-11 にかえり、最後に残された

$$V=a+bH$$

式について考察する。表でみられるように、層化しない場合、さらに本数の少ない層において、この式の精度は

$$V=aH^b$$

式に劣っている。しかし両者の差はそれほど顕著なものではなく、本数の多い場合はむしろ逆の関係がみられる。このことは実用式として

$$V=aH^b$$

に代えて

Tab. II-13 The standard deviations about the regressions $V=aH^b$ and $V=a+bH$.

| District | Class | $V=aH^b$ | $V=a+bH$ |
|--|-----------------|----------|----------|
| Yamaguni | 500～3000 no./ha | 16.3% | 15.0% |
| | 500～1000 | 14.7 | 13.8 |
| | 1000～2000 | 15.1 | 11.9 |
| | 2000～3000 | 13.3 | 13.8 |
| Obi | 200～1700 | 18.1% | 18.6% |
| | 200～ 500 | 18.4 | 18.4 |
| | 500～1000 | 13.7 | 15.1 |
| | 1000～1700 | 11.7 | 11.0 |
| Haguro | 500～2000 | 17.4% | 17.5% |
| | 500～1000 | 18.9 | 18.6 |
| | 1000～2000 | 14.6 | 14.3 |
| Akita (for stands 10 m height and above) | 500～3000 | 26.4% | 20.7% |
| | 500～ 700 | 15.0 | 13.7 |
| | 700～1000 | 14.1 | 13.1 |
| | 1000～1500 | 20.1 | 16.8 |
| | 1500～2000 | 17.6 | 17.4 |
| | 2000～3000 | 16.3 | 13.4 |

Note. The figures are the percentage of standard errors of residuals.

$$V=a+bH$$

式が用いられることの可能性を示唆するものと考えられる。後者は対数計算を必要としない点でより有利である。

そこで他の4地域のスギ林で両式の精度を比較したものが Tab. II-13 である。この表にみられるように両式の精度に著しい差は認められない。

したがって実用式として

$$V=a+bH$$

式は航空林分材積式となりうると考えてよい。

両式の精度に差が認められない理由としてはつぎのような指摘が可能であろう。

VとHの関係が曲線関係をなすことは、吉田²⁶⁾も生長の立場から論じている。筆者もこの関係を認めるものである。ところで樹高に対する材積の関係を図上にプロットすると、通常、プロットはかなりのちらばりを示す。このちらばりは、樹高が低い場合は小さいが、樹高が高くなるに従い大きくなる。そのため両者の曲線関係が点のちらばりにかくされ、必ずしも明らかではなくなる。このことが、両材積式の精度に顕著な差が認められない原因であると思われる。

つぎに層化を行なった場合を考えてみよう。この場合、一つの層内での樹高の動きは限定される。そこで、全体として曲線関係にある樹高対材積の関係の一部を扱うことになる。このため、その範囲内では直線で十分近似され得るものと考えられる。

さらに

$$V=a+bH$$

式は、地上林分材積式としてよく用いられる

$$V=a+bGH$$

式で

$$G=K(\text{Const.})$$

とおいたものとも考えることも可能である。このことも、本材積式に根拠を与える。

以上、筆者の導いた航空林分材積式について、ここでは主として精度の面から検討した。とくに層化については理論的根拠に基づきわめて合理的な層化方法を見出した。さらに材積式の形についても考察を加えた。

ここに得られた成果を個条書に示すとつぎのようになる。

(i) 層化は、本数の多いところで広く、本数の少ないところで狭く行なえばよい。

(ii) 本数の少ないところでは

$$V=aH^b$$

式にかえて

$$V=aH^b N^c$$

式を用いることが精度的に望ましい。

(iii) 実用式として

$$V=aH^b$$

式にかえて

$$V=a+bH$$

式を用いることが可能である。

III. 材積式の独立因子の測定精度

Ⅱにおいて普遍性があり、しかも高精度な航空林分材積式について考究した。その結果、本数による層化を行ない、各層で

$$V=aH^b \text{ 式} \quad (\text{実用式 } V=a+bH \text{ 式})$$

を適用するという新しい材積式のあり方を示した。

ここでは写真上での本数と樹高の測定精度について検討する。写真上での本数測定の困難性がこうした材積式を導くことになり、その意味では判読因子の写真上での測定についてもいままで若干ふれている。しかしここでこの問題をさらに深く考察する。その理由は先にも述べたように、写真上での測定精度は材積式の精度とは別のものであり、両者が共に材積表使用時の精度を左右するからである。

樹高は航空林分材積式の独立変数として数多く用いられ、その写真上での測定精度についてもかなり研究が行なわれている⁵⁾⁶⁾²⁷⁾。したがって従来の研究成果から誤差の大きさをおおよそ見積めることは可能である。しかしここでとりあげる航空林分材積表の精度を考えるにあたって、わが国スギ人工林の実際の樹高測定精度を知ることは重要である。そこで筆者は航空写真上での樹高測定精度に関していくつかの研究を行なった。その結果をとりまとめここに述べることにする。

本数は数の少ない場合を除いて一般に写真上での測定は難しいといわれる。そのため層化の考え方を導入した。したがって写真上で層の判別がどの程度可能であるかという問題がここで主として検討される。

III-1. 樹 高

航空林分材積式の独立変数として用いられるものは、いうまでもなく林分平均樹高である。そこで測定精度についても単木樹高は直接対象とならない。しかし写真上実際に測定されるのは単木の樹高であり、数〜数10本の単木の樹高を測定し、その平均値を林分平均樹高とするのが通例である。そこでここではまず単木樹高の測定精度について述べ、つぎに林分平均樹高測定の精度の考察を行なう。

1. 単木樹高

(1) 平地での検討

平地で樹高測定を行なうなら、全くの初心者でも同一木に対して40〜50回の測定練習をくりかえすと比較的安定した測定が可能になる²⁸⁾。このように樹高測定は予想される程困難な仕事ではない。

経験の浅い3名の測定者により平地孤立木の樹高測定精度を検討した²⁹⁾。

測定対象は広葉樹31本、針葉樹31本であり、樹高範囲は10〜22 mである。使用写真はキョウト、セイホクブ、山—356 (オグラヤマ)、C4-10, 11, 1964. 4.27, キョウトの2.5倍引伸写真であり、写真縮尺は約1:9,000である。測定は各人が各対象木につき6回くりかえして行なった。測定誤差は系統的なものと偶然的なものにわけて検討した。

得られた結果を個条書に示すと以下のとおりである。なお有意性の検定では有意水準は5%とした。

- (i) 系統的誤差は負の値をとり誤差率でおおよそ5%以内におさまる.
- (ii) 偶然的誤差は変動係数でおおよそ10%以内におさまる.
- (iii) 測定誤差は測定木の高さに影響され, 木が高くなるにしたがい誤差の値は大きくなる.
- (iv) 測定者間に系統的誤差, 偶然的誤差ともに有意差が認められる.

(2) 山岳地での検討

つぎにここで問題となる山岳地におけるスギ林縁木の樹高測定精度を検討した³⁰⁾.

測定は京都市左京区花背の各種齢級のスギ林分において数本ずつの林縁木を選び, 合計59本(13.9~23.6 m, 平均18.05 m)を対象として行なった. 使用写真は, キタコマツ, 山515(ケイホク)C5-15, 16, 1968. 4. 21. キョウトフである. 視差測定は7名の測定者が各対象木を各10回測定し, 得られた視差差の平均値を写真上での測定値とした. 測定値は視差式により樹高に換算した. 現地実測は1969年8月にブルーメライス測高器によって行なった. 写真上での測定者はいずれも経験は浅い. 得られた系統的誤差(地上実測値と写真測定値の差)と偶然的誤差(10回の測定値の変動係数)をTab. A. III-1に示す.

これらの誤差の解析を共分散分析法により行なった.

まず系統的誤差をとりあげ, 測定者間に差が認められるかどうかの検討を行なった. ここで樹高によって誤差が影響を受けることを考え, 樹高を指定変数とした一元配置の共分散分析を行なった. ここでも有意水準は5%とする.

その結果, 回帰係数は有意であること, 測定者間に差が認められることがわかった. そこで7名の測定者の中で他と異なる傾向を示すD.E.の2名を除いた5名によって再度共分散分析を行なった. その結果をTab. III-1に示す.

この結果回帰係数は有意であること. 5名の測定者間には差が認められないことなどがわかった.

ここまで得た結果をまとめるとつぎのようになる.

- (i) 測定者間には差が認められた. ただし2名を除く5名については差は認められな

Tab. III-1 The analysis of covariance for systematic errors of height measurements on air photos.

| Factor | DF | SMM | SMH | SHH | $\frac{S^2MH}{SHH}$ | $SMM - \frac{S^2MH}{SHH}$ | DF | MS |
|----------------|-----|-----------|-----------|-----------|---------------------|---|---|--------|
| Between groups | 4 | 14.3015 | 0 | 0 | | | | |
| Within groups | 290 | 1146.9553 | -620.5114 | 1959.1356 | 196.5328 | 950.4225 | 289 | 3.2887 |
| Total | 294 | 1161.2568 | -620.5114 | 1959.1356 | 196.5328 | $\begin{array}{r} 964.7240 \\ - 950.4225 \\ \hline 14.3015 \end{array}$ | $\begin{array}{r} 293 \\ 289 \\ \hline 4 \end{array}$ | 3.5754 |

$$F : \frac{3.5754}{3.2887} = 1.0872$$

$$\text{Regression coefficient} : \frac{196.5328}{3.2887} = 59.7608 *$$

$$\text{Difference of regression coefficient} : F_0 = \frac{14.6701/4}{935.7524/285} = 1.1170$$

い。

(ii) 回帰係数は有意である。すなわち樹高を指定変数にとって行なったこの解析は有効であり、系統的誤差が樹高に影響される。

つぎに差の認められない5名の測定者をこみにして系統的誤差の大きさをみた。ここでx軸に樹高、y軸に系統的誤差をとり、回帰分析を行なった。各測定誤差をプロットし

$$\hat{y} = a + bx$$

式をあてためた。ここで

$$\bar{x} = 18.05$$

$$S_y^2 = 1161.2568$$

$$S_{yx} = -620.5114$$

と計算され、回帰式は

$$\hat{y} = 4.9677 - 0.316727x$$

となった。そこでこの式によりxの各値に対するyの値を計算したのが Tab. III-2 である。

この表よりわかるように誤差は樹高の低いところでプラスの値も現われるが、一般にはマイナスとなる。大きい木になるに従い、誤差、誤差率ともにマイナスの値で大きくなる。

さらに回帰式に信頼度95%の信頼幅をつけた結果を Tab. III-3 に示す。

つぎに偶然的誤差について述べる。偶然的誤差は変動係数であらわした。なおここで変動係数は近似的に正規分布をなすものとみなし、一般の共分散分析法を適用した。7名の測定者に対する共分散分析の結果を Tab. III-4 に示す。

この結果偶然的誤差についても回帰関係は認められ、測定者間にも差がみられることがわかった。ここで D.E. を除く5名について共分散分析を行なったが、その結果は上述し

Tab. III-2 The systematic errors of height measurements on air photos.

| Height(x) m | 15 | 18.05 | 20 | 25 |
|-------------------------|------|--------|--------|--------|
| Error (\hat{y}) m | 0.22 | - 0.75 | - 1.37 | - 2.95 |
| Percentage of error (%) | 1.5 | - 4.2 | - 6.9 | -11.8 |

Tab. III-3 The confidence limits of the systematic errors at 95% level of probability.

| X (m) | 15 | 18.05 | 20 | 25 |
|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| $\hat{y} + t_{0.05} s_{\hat{y}}$ | 0.37 | - 0.96 | - 1.61 | - 3.25 |
| $\hat{y} - t_{0.05} s_{\hat{y}}$ | 0.07 | - 0.54 | - 1.13 | - 2.65 |
| $\hat{y} + t_{0.05} s_y$ | 3.78 | 2.81 | 2.19 | 0.62 |
| $\hat{y} - t_{0.05} s_y$ | - 3.34 | - 4.31 | - 4.93 | - 6.52 |

$$s_{\hat{y}} = s_y \cdot x \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{\sum (x - \bar{x})^2}}$$

$$s_y = s_y \cdot x \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{\sum (x - \bar{x})^2}}$$

Tab. III-4 The analysis of covariance for C. V. of height measurements on air photos.

| Factor | DF | SCC | SCH | SHH | $\frac{S^2HC}{SHH}$ | SCC - $\frac{S^2HC}{SHH}$ | DF | MS |
|----------------|-----|-----------|-----------|-----------|---------------------|---------------------------------------|-----------------|----------|
| Between groups | 6 | 3011.2719 | 0 | 0 | | | | |
| Within groups | 406 | 3540.5905 | -615.3471 | 2742.7898 | 138.0536 | 3402.5369 | 405 | 8.4013 |
| Total | 412 | 6551.8624 | -615.3471 | 2742.7898 | 138.0536 | 6413.8088 - 3402.5369 3011.2719 | 411 405 6 | 501.8787 |

$$F: \frac{501.8787}{8.4013} = 59.7382 *$$

$$\text{Regression coefficient: } \frac{138.0536}{8.4013} = 16.4324 *$$

$$\text{Difference of regression coefficient: } F_0 = \frac{99.4081/6}{3303.1288/399} = 2.0013$$

$$F_{\infty}^6(0.05) = 2.09$$

た7名による解析結果と同一であった。このように偶然的誤差は木の高さや測定者によって異なるが、その大きさは附表にみるように変動係数でほぼ10%程度であった。

(3) まとめ

以上、単木についての若干の検討により得られた結果をまとめる。

(i) 写真上での樹高測定は比較的容易にマスターされる。たとえば全くの初心者でも同一木で40~50回の練習をつむと比較的安定した測定値が得られる。

(ii) 系統的誤差(誤差率)は木の高さに影響される。低い木ではプラスの誤差を生じることもあるが、一般にはマイナスの誤差となり、木が大きくなるに従いマイナスの誤差(誤差率)は大きくなる。

(iii) 系統的誤差の大きさは平均的な木で-5%程度である。

(iv) 偶然的誤差の大きさは10%(変動係数)程度である。

(v) 系統的誤差、偶然的誤差ともに測定者による差が認められる。

以上のまとめで明らかなように、写真上での樹高測定は、比較的容易にマスターされ、しかも経験の浅い者でもかなり高い精度で測定が可能である。測定者による差は認められたが、これは経験が浅いことにも原因すると考えられる。山岳地のスギを対象とした測定では、7名中5名の間には有意差は認められなかった。ここでは回帰係数の差にも有意差は認められず、5名が同じ傾向で測定していることがわかる。

梶原³¹⁾は地上での樹高測定精度について検討した。その結果は地上で測高器による樹高測定を行なっても、場合によっては系統的誤差が-3~-4mにおよぶ(通常は±2m以内)ことを示している。こうした事実を考慮するなら、写真上での樹高測定は十分実用になるものと考えられる。

2. 林分平均樹高

写真上での林分平均樹高の測定精度は樹高を用いた航空林分材積表による林分材積推定の精度を直接左右する。したがってこの精度を知ることとはとくに重要である。ここでは2

つの地域のスギ林分を対象に検討した。対象地域は飢肥と雲ヶ畑であり両者の林形は異なる。写真上での測定には A, B 2 名があった。2 名の測定者は写真上での樹高測定にある程度熟練した者である。

雲ヶ畑では測定者 A が 64 プロットを対象に測定を行なった。そのうちの 40 プロットについては測定者 B も測定した。一方飢肥では測定者 B が 49 プロットを対象に測定した。これによって同一地域での測定者間の差と、同一測定者による対象林形による差についても検討が可能となる。

地上での樹高測定と平均樹高の算出については II-3 に述べたとおりである。なおここで対象とする地上平均樹高は上層木平均樹高とする。

(1) 写真上での測定

測定には反射式立体鏡と 2.5 倍の引伸写真を用いた。測定は各プロットで平均的な樹高を持つと考えられる 10 本の樹木について行なった。ところで現実に写真上では、1 本 1 本の樹木の判別が難しい場合がみられた。その場合には対象林分の梢端平均面を想定し、地際とこの梢端平均面の視差差を視差測定桿により 10 回測定するという操作を行なった。またプロット内で地際が見出せない場合もあった。この場合、プロットの地面高と同じと考えられるプロット外の地点を代用した。

10 回の測定の平均値を写真上での視差差測定値とし、

$$\Delta h = \frac{H_G^2}{H_0 b} \Delta p$$

Δh : 平均樹高

H_0 : 基準面からの飛行高度

H_G : 林分の地際からの飛行高度

b : 写真基線長

Δp : 視差差

式を使って林分平均樹高に換算した。この値を写真上での測定値とした。

(2) 測定結果

雲ヶ畑と飢肥での測定結果を Tab. A. III-2 に示す。

(3) 考 察

まず林分平均樹高測定の精度について考察する。

ここで各地域、各測定者による写真測定値と地上実測値について回帰分析を行なった。すなわちグラフ上で x 軸に地上実測値、y 軸に写真上での測定値をとりプロットした。プロットされた各点はばらつくが、これらの間にはほぼ直線関係が認められた。そこで

$$\hat{y} = a + bx$$

式をあてはめ、最小二乗法で a , b を決定する。また回帰式の残差の標準誤差を求め偶然的誤差の大きさを見た。

まず雲ヶ畑で測定者 A が測定した結果を示す。この場合回帰式は

$$\hat{y} = 0.3653 + 0.9422 x$$

となり

$$s_{y \cdot x} = 1.64 \text{ m}$$

$$\frac{S_{y \cdot x}}{\bar{y}} \times 100 = 9.05\%$$

となる。各樹高におけるかたよりの量を Tab. III-5 に示す。

この表から明らかなように、単木樹高の測定においてみられた傾向がここにもあらわれている。すなわち林分平均樹高についても、写真上では一般に過小に測定し、しかも木の高いもの程、その率も高い。

この傾向は飼肥で測定者Bが測定した場合にもみられる。この場合

$$\hat{y} = 3.1741 + 0.7552x$$

$$S_{y \cdot x} = 1.32 \text{ m}$$

$$\frac{S_{y \cdot x}}{\bar{y}} \times 100 = 8.30\%$$

であった。また各樹高におけるかたよりの量は Tab. III-6 に示すとおりである。

誤差は樹高の低い部分ではプラスもあらわれるが一般にはマイナスとなる。

このように写真上で樹高測定を行なうと、上に述べたようなかたよりの持つことがわかった。

ところで筆者は航空林分材積式の独立因子に地上実測値を用いて検討を加えてきた。そこで地上実測樹高に基づいて材積式が計算された。この場合、写真測定樹高がこうしたかたよりの持つなら、このかたよりは修正されなければならない。このかたよりを修正する方法としてつぎの方法が考えられる。

すなわちいまた関係を逆に利用する。x 軸に写真測定値、y 軸に地上実測値をとり、最小二乗法によって

$$\hat{y} = a + bx$$

の a, b を決定すれば、この式が修正式として使用できると考える。いまこの考え方によって雲ヶ畑と飼肥について修正式を求めたのがつぎの式である。

$$\text{雲ヶ畑: } \hat{y} = 2.2769 + 0.9140x$$

Tab. III-5 The systematic errors of stand height measurements on air photos in Kumogahata district.

| x (m) | 10 | 15 | 18.81 | 20 | 25 | 30 |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| \hat{y} (m) | 9.79 | 14.50 | 18.09 | 19.21 | 23.92 | 28.63 |
| Error (m) | -0.21 | -0.50 | -0.72 | -0.79 | -1.08 | -1.37 |
| Percentage of error | -2.1 | -3.3 | -3.8 | -4.0 | -4.3 | -4.6 |

Tab. III-6 The systematic errors of stand height measurements on air photos in Obi district.

| x (m) | 10 | 15 | 16.88 | 20 | 25 |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| \hat{y} (m) | 10.73 | 14.50 | 15.92 | 18.28 | 22.05 |
| Error (m) | +0.73 | -0.50 | -0.96 | -1.72 | -2.95 |
| Percentage of error | +7.3 | -3.3 | -5.7 | -8.6 | -11.8 |

$$\hat{y} = -0.2425 + 1.0754x$$

これらの式によって写真上での測定値を地上実測値になおすことが可能であると考え
る。

つぎに林分平均樹高における個人差と対象林形による差について考察した。

まず個人差を検討した。雲ヶ畑の40プロットについて測定者 A, B が行なった測定結果
をこの場合の資料とした。

検討は A, B についてそれぞれ直線回帰式を求め、両回帰式に有意差が認められるか否
かによって行なった。ここで A の回帰式を

$$\hat{y} = a_1 + b_1x$$

B の回帰式を

$$\hat{y} = a_2 + b_2x$$

とした。

まず $F = \frac{S_{yx1}}{S_{yx2}}$ の値を求め、 $F_{n_1-2, n_2-2}^{\alpha}$ で F 検定による分散の一様性を検定した。両者の間
に有意差が認められなかったののでつぎに進み

$$S_{b(1-2)}^2 = \frac{(n_1-2)s_{yx1}^2 + (n_2-2)s_{yx2}^2}{n_1+n_2-4} \left(\frac{1}{SX_1^2} + \frac{1}{SX_2^2} \right)$$

$$S_{a(1-2)}^2 = \frac{(n_1-2)s_{yx1}^2 + (n_2-2)s_{yx2}^2}{n_1+n_2-4} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{\bar{x}_1^2}{SX_1^2} + \frac{1}{n_2} + \frac{\bar{x}_2^2}{SX_2^2} \right)$$

を計算した。つぎに

$$t_b = \frac{|b_1 - b_2|}{S_{b(1-2)}} \quad D.F = n_1 + n_2 - 4$$

$$t_a = \frac{|a_1 - a_2|}{S_{a(1-2)}} \quad D.F = n_1 + n_2 - 4$$

によって t 検定を行なった。

ここで A の回帰式

$$\hat{y} = 0.807847 + 0.928012x$$

B の回帰式

$$\hat{y} = 1.132422 + 0.890378x$$

であり、上述の手續に従って計算した結果

$$t_b = 0.371742$$

$$t_a = 0.162102$$

となった。

ここで t 表より、有意水準 5% として、

$$t_{D.F=120}(0.05) = 1.980$$

したがって有意差なし。すなわち両測定者間の測定に有意差が認められないことが判明
した。

このことは同一対象林分について、ある程度の熟練者により写真上で樹高測定を行なう
と、ほぼ同じような測定結果となることを示している。したがって先に述べた修正式が他
の人（とくに著しいくせを持つ人を除いて）にもあてはまることが考えられる。この事実
は修正式に一般性を与えるという意味できわめて重要である。

最後に同一測定者による対象林形による差について検討した。雲ヶ畑と飢肥では林形が異なり、対象林形の違いによる差が予想されたからである。

ここでは測定者Bによる雲ヶ畑と飢肥での測定結果をもとに、上述の検定方法によって有意性の検定を行なった結果を示す。

ここで

$$\text{雲ヶ畑} : \hat{y} = 1.132422 + 0.890378x$$

$$\text{飢肥} : \hat{y} = 3.174093 + 0.755223x$$

であり、計算された t の値は

$$t_b = 1.77192$$

$$t_a = 4.8062^* \quad (\text{有意水準 } 5\%)$$

である。

a に有意差が認められるので、両式間には有意差があることになる。

したがって同一測定者であっても対象林形を異にすると得られる樹高測定結果は異なることがわかった。そこで対象林形を異にする場合、同一人であっても修正式はそれぞれの林形に対して作成される必要があると考えられる。ただ b に有意差がみられないので、かたよりの傾向は一般的な傾向にあることがわかる。

(4) まとめ

以上林分平均樹高の測定精度について検討した。これについては資料も少なく、必ずしも十分な解析が行なわれたとはいえない。しかしこの資料によってもおよその傾向はつかみ得たと考えられる。ここに結果を総括する。

(i) 系統的誤差は 18 m 程度の平均樹高に対し $-0.7 \text{ m} \sim -1.0 \text{ m}$ ($-4 \sim -6\%$) 程度となる。大きい平均樹高をもつ林分では大きい負の誤差ならびに誤差率となる。

(ii) 偶然的誤差は回帰式の残差の標準誤差でほぼ 1.5 m、残差の百分率標準誤差では 10% 程度となる。

(iii) 写真上で樹高測定誤差(系統的誤差)は回帰式で修正が可能であると考えられる。ただし対象となる林形を異にするなら異なった回帰式が作成される必要がある。

III-2. 本 数

1. 本数が少なく、写真上で個々の立木の測定が比較的容易な場合

写真上で本数測定は比較的個人誤差が少ない³²⁾といわれる。したがって本数が少なく、測定誤差が小さいと考えられる範囲では、航空林分材積式の独立因子として本数は重要なものと考えてよい。

いま飢肥スギ林の 39 プロットを対象に、写真上で本数測定を行なった結果を Tab. A. III-3 に示す。写真上では各プロットでそれぞれ 3 回の測定を行ない、その平均値を写真測定値とした。ここで対象としたプロットの ha あたり本数は、1,660 本(上層木 1,590 本)のが最も多い本数であった。

まず地上実測本数と写真測定本数との相関の程度を相関係数によって検討した。その結果、地上実測全本数と写真測定本数との相関係数は

$$r = 0.8963^{**} \quad (** \text{ 有意水準 } 1\% \text{ で有意})$$

となり、地上実測上層木本数と写真測定本数間の相関係数は、

$$r=0.9257^{**} \quad (** \text{ 有意水準 } 1\% \text{ で有意})$$

となり、両者の間に高い相関関係がみられた。

そこでこの資料を用いて本数測定誤差に関する若干の検討を行なった。なおここでは、地上実測値として地上実測上層木本数を用いた。

まず39プロットの平均値で誤差を検討した。

$$\bar{x}=740 \text{ 本/ha}$$

$$\bar{y}=656 \text{ 本/ha}$$

$$e=\frac{\bar{y}-\bar{x}}{\bar{x}} \times 100=\frac{-84}{740} \times 100=-11.4(\%)$$

\bar{x} : 地上実測値の平均

\bar{y} : 写真測定値の平均

となり、写真上ほぼ10%過少推定していることがわかった。

さらに両測定値間に回帰関係を想定し、一次式による回帰式を適用した。

その結果

$$\hat{y}=5.07+0.87953x$$

\hat{y} : 写真測定本数

x : 地上実測本数

となり、かたよりの量は Tab. III-7 のようになった。

表に明らかなように、本数も樹高と同様一般にマイナスのかたよりを示す。また誤差率で-10~-12%となっている。

つぎに偶然的誤差を回帰式の残差の標準誤差で検討した。

その結果は、

$$s^2_{y,x}=12924$$

$$s_{y,x}=114 \text{ 本/ha}$$

$$\text{誤差率}=17.4\%$$

であった。

この例では、本数の多いデータも含んでおり、必ずしも低い誤差率とはいいきれない。しかし、本数が少ない場合(500本/ha未滿程度)は、写真上でも比較的精度高く、本数測定が可能なことは、この例からも予想される。ところで本数が多くなれば、写真上での1本1本の立木判別はきわめて困難なものとなる。つぎにこうした場合について検討してみよう。

2. 本数が多く、写真上で個々の立木の測定が困難な場合

この場合筆者は、ある幅に含まれる本数は同一のものとみなす層化の考え方を導入し

Tab. III-7 The systematic error of stand density measurements on air photos.

| x (no.) | 200 | 400 | 600 | 800 | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| \hat{y} (no.) | 181 | 357 | 533 | 709 | 885 | 1061 | 1236 | 1412 |
| Error (no.) | -19 | -43 | -67 | -91 | -115 | -139 | -164 | -188 |
| Percentage of error | -10 | -11 | -11 | -11 | -12 | -12 | -12 | -12 |

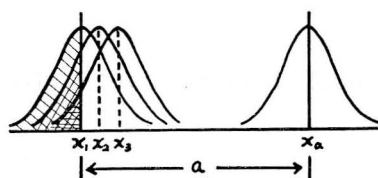


Fig. III-1 The illustration showing the probability of misinterpretation of the density class.

た。ここで層自体写真上でどの程度正確に判別されるかが問題となる。

層の判断を誤る確率は、ある程度理論的に考えることが出来る。

いまつぎの3つの仮定を置こう。

まず、一つの層内では本数の分布は一樣であるとする。つぎに写真上での本数測定値は、真の値を中心に正規分布するものとする。そして測定値の標準偏差は層内では一定とする。

ここで層の幅を a とした場合、層の判断を誤

る確率を考える。

模式図 Fig. III-1 を参考に検討する。

図において本数 x_1 と x_a の間を一層とし、層の幅を a とする。ここで x_1, x_2, x_3, \dots を中心とする正規分布を想定し、 x_1 の左側の層に判断を誤る場合を考えると、それぞれ斜線をほどこした部分がそれに相当する。これが全体の何%を占めるかにより、判断を誤る確率が求められる。両側の層を考える場合、得られた値を2倍すればよい。層の判断を誤る確率を求めるため、ここで

$$t = \frac{X - x_1}{\sigma}$$

によって基準化された正規分布を用いる。

この場合 Fig. III-1 の斜線で示された面積を I_1 で表わせば、

$$I_1 = \int_{-\infty}^{-t_1} \varphi(t) dt$$

$$\varphi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}}$$

変量 I はまた t の関数として表わせるので、これを $I(t)$ とおくと、判断を誤る量 e は次式で求められる。

$$e = \int_0^a I(t) dt$$

ここで

$$\alpha = \frac{x_a - x_1}{\sigma} = \frac{a}{\sigma}$$

これに対する全体の値は

$$\int_0^a dt = \alpha$$

である。したがって、判断を誤る確率 $P(e)$ は、

$$\begin{aligned} P(e) &= \frac{\int_0^a I(t) dt}{\int_0^a dt} \\ &= \frac{\int_0^a I(t) dt}{\alpha} \end{aligned}$$

となる。

ここで層の両側を考慮に入れると、判断を誤る確率は、

$$2P(e)$$

で与えられる。

いま層の幅が標準偏差に等しい場合を考える。この場合、 $\alpha=1$ であり

$$e = \int_0^1 I(t) dt$$

となる。この値は正規分布の表³³⁾をもとに求めることができる。これに対する全体の値は

$$\int_0^1 dt = 1$$

であり、判断を誤る確率は

$$\begin{aligned} P(e) &= \frac{\int_0^1 I(t) dt}{1} \\ &= \int_0^1 I(t) dt \end{aligned}$$

となる。

いま、 $\alpha=1\sim 4$ の各場合について、 e 、 $P(e)$ 、 $2P(e)$ の値を計算した結果を示すと、Tab. III-8の通りである

ここで α をさらに大きくすると、

$$e = \int_0^\alpha I(t) dt$$

の値は大きくなる。しかし表の e 欄の数字の動きで明らかのように、この値の変化量はきわめてわずかである。そこで α の大きい場合

$$e = \int_0^\alpha I(t) dt \doteq 0.4$$

とおくことができよう。この場合

$$P(e) = \frac{0.4}{\alpha}$$

$$2P(e) = \frac{0.8}{\alpha}$$

で、判断を誤る確率をおさえることが出来る。

したがって、いま仮に、判断を誤る確率を片側5%にすることを考えるなら、

$$\frac{0.4}{\alpha} = 0.05$$

より、 $\alpha=8$ となる。

このことは、標準偏差が50本であるなら、層の幅を400本に、標準偏差が100本であるなら、層の幅を800本にする必要があることを示している。

さて標準偏差の大きさが、層の幅を決める尺度となるので、ここで具体的な層化のあり方を考えてみる。

Tab. III-8 The probability of mis-interpretation of stand density class.

| α | e | $P(e)$ | $2P(e)$ |
|----------|--------|--------|---------|
| 1 | 0.3156 | 0.3156 | 0.6312 |
| 2 | 0.3903 | 0.1952 | 0.3904 |
| 3 | 0.3984 | 0.1328 | 0.2656 |
| 4 | 0.3988 | 0.0997 | 0.1994 |

前述した飼肥の場合の標準偏差は、回帰式の残差の標準誤差で114本であった。ここで本数の少ない場合と多い場合に層わけして、各層における標準偏差を計算すると、

200～500本/ha 層 $\sigma = 56$ 本

500～1,700本/ha 層 $\sigma = 124$ 本

となる。

この例でもわかるように、一般には本数が多くなると標準偏差は大きくなると考えられる。このため、本数の多いところでは層の幅を広くしなければ、層の判断を誤る確率は高くなるものと考えられる。これに対し、本数が少ないところでは、層の幅を狭く出来ることになる。

したがって写真上での本数測定面から考えても、筆者の航空林分材積式の考え方は合理的なものとして評価できよう。

最後に層の判断を誤る確率を低くする方法について考えてみよう。

層の判断に影響を与えるものとして、写真の倍率、鮮明度などがあげられる。しかしこれらの条件が所与の場合にあっては、比較判別写真(ステレオグラム)を作成し、これを補助として層の判別を行なうことが考えられる。ここでステレオグラムの持つ意味は、写真上での本数測定の標準偏差を小さくするものと考えてもよい。こうした意味において筆者は、本数層判定用のステレオグラムを航空林分材積表に組込むものとする。

IV. 総 括

使いやすく、しかも精度の高い航空林分材積表を見出すことが本研究の目的であった。

この目的を達成するため、人工同齢林を対象に、普遍性のある航空林分材積式を検討し、新しい航空林分材積式のあり方を提起した。

筆者が導いた材積式は、

本数が少なく、写真上での本数測定が容易で、しかも精度高く行ない得ると考えられる範囲(500本/ha未滿程度が一応の目安となろう)では、航空林分材積式として

$$V = aH^b N^c$$

式を適用し、

本数が多く、写真上での本数測定が難しいと考えられる範囲では、本数を層化に用い、層化された各層において

$$V = aH^b \quad (\text{実用式 } V = a + bH)$$

式を適用するというものである。なお層の幅は、本数の少ないところで狭く、多いところで広くする。

こうした材積式に基づき、航空林分材積表を作成する。この際、層の判別を容易にする目的で、航空林分材積表にステレオグラムを組込んでおく。

本研究の成果は、合理的な層化方法による高精度な航空林分材積式の誘導にある。しかもその際、使いやすいという条件を十分考慮に入れた点にあると考える。

使いやすいという面での配慮は、

- (i) 独立因子の数を制限し、樹高と本数に限ったこと
- (ii) 本数の写真上での測定は、測定の容易な場合に限って行ない、その他の場合はス

テレオグラムを補助として、層の判別のみ行なえばよいとしたことなどがあげられる。

こうした配慮によって、實際上測定すべき要因は樹高のみとなり、もっとも簡単な一変数材積表による場合にほぼ等しい手間しか要求されないことになる。それにもかかわらず、精度的には十分高いことも証明済みである。

ここにおいて、使いやすく、しかも精度が高い航空林分材積表を見出す、という本研究の目的はほぼ達成されたものと考ええる。

ここでさらに写真上での測定誤差と材積式の誤差が加わる実際に材積表を適用する際の誤差にふれ、本研究成果を総括する。

ここでは層の判定は正しく行なわれたものとして、樹高測定誤差と材積式の誤差が加わった全誤差を考える。

この場合

$$Sp = \sqrt{S^2m + S^2e}$$

Sp : 全標準誤差 (%)

Sm : 写真上での樹高測定の標準誤差 (%)

Se : 材積式自体の標準誤差 (%)

式で全標準誤差は計算される。

ここで実例として熊本スギの場合について Sp の計算を行なってみる。

写真上での樹高測定誤差は III-1 で検討した。その結果により、

$$Sm = 10 \text{ (%)}$$

程度と考えてよい。一方、材積式自体の誤差は Tab. II-11 に明らかである。これらの結果を用い、Sp はつぎのように計算される。

層化しない場合

$$Sp = \sqrt{10^2 + 30.4^2} = 32 \text{ (%)}$$

4層化した場合

～ 500 本/ha 層

$$Sp = \sqrt{10^2 + 25.3^2} = 27 \text{ (%)}$$

500 ～ 1000 本/ha 層

$$Sp = \sqrt{10^2 + 19.6^2} = 22 \text{ (%)}$$

1000 ～ 2000 本/ha 層

$$Sp = \sqrt{10^2 + 14.7^2} = 18 \text{ (%)}$$

2000 ～ 4000 本/ha 層

$$Sp = \sqrt{10^2 + 9.1^2} = 14 \text{ (%)}$$

ここで4層化において、～500本/ha層と500～1,000本/ha層では、誤差率が20%を越えている。これらの層をさらにこまかく層化することを考えるなら、各層において20%以下の誤差率におさえることも可能であろう。層化を考えない従来の材積表の適用精度（この場合は32%）にくらべるなら、筆者の材積表が精度面においても十分優れたものであることが、ここに明らかである。

以上筆者は、望ましい航空林分材積式について論じ、その成果をもととする材積表の適

用精度についてもふれた。いうまでもなく、これによって航空林分材積表に関する問題が全て片付いたわけではない。筆者の材積表においても、材積式の誘導に帰納的部分を残していること、本数測定精度についても十分な実証的検討が行ない得なかったこと、などいずれも今後の課題である。

しかし筆者は、本材積表が、その普遍性において、また精度的にも実用的にも、従来の航空林分材積表にくらべより優れたものであることを確信する。

最後に、こうした考え方に基づく航空林分材積表を、飢肥地方スギ林を対象に実際に作成し、本研究の成果を明らかにした。

その結果も本材積表の有効性を裏づけており、ここにこの材積表を望ましい航空林分材積表と考えるものである。

V. 飢肥地方スギ人工林航空林分材積表の作成³⁴⁾

V-1. 資 料

本材積表の適用範囲は飢肥営林署管内のスギ人工林とする。

材積表作成の資料として II-3 の 1 に記した飢肥国有林に関する現地調査資料39個の内 No. 34 を除いた38個に、Tab. A. V-1 に記す53個を加えた合計91個を用いた。53個の資料の内訳は前記38個の資料を収集した同時期に、他の目的のために調査された資料5個、日南経営計画区の経営計画作成のために調査されたものの内、飢肥営林署管内の資料19個、さらに収穫予想表作成のために収集された資料29個である。

このように資料は必ずしも同時期にそろって収集されたものではない。しかしいずれも信頼にたる資料である。飢肥営林署管内スギ人工林の航空林分材積表として、十分実用にたるものを作成するため、できるだけ多くの資料を用いた。ところで収穫予想表作成のための資料などにあっては、上、下層木区分が行なわれていない。そこでこの材積表作成は下層木を含めた合計値で行なった。

V-2. 航空林分材積表の作成

航空林分材積式は本研究の成果に基づくものを用いる。すなわち、本数を層化に用い、各層で

$$V = aH^b$$

式を材積式として適用することを考えた。

層の幅については現地調査資料44個 (Tab. A. II-3, No. 1~No. 39, Tab. A. V-1, No. 1~No. 5) をもとにあらかじめ検討した。層の幅をかえ、回帰式を求め、誤差の大きさを計算した結果が Tab. V-1 である。本数の多い1,000~1,700本/ha層は本数の写真上での測定面から、これ以上の層化は不可能と考える。こうした本数の多い部分は、層の幅を広げても材積式の精度は落ちないというのが筆者の考え方である。ここでも誤差率は10.5%ときわめて小さく、その点の実証されている。500~1,000本/ha層についてはこの層を2層化しても誤差率の低下は明白でない。したがってここも一層として扱ってよい。200~500本/ha層の

Tab. V-1 The regression equations and the percentage of standard errors of residuals.

| Equation | Class | Number of plots | Regression equation | Percentage of standard errors of residuals |
|---------------|-------------------------|-----------------|------------------------------------|--|
| A $V=aH^b$ | no./ha | | | % |
| | A ₁ 200~1700 | 44 | $V=5.059 H^{1.4930}$ | 16.8 |
| | A ₂ | | | |
| | ① 1000~1700 | 9 | $V=1.395 H^{2.0370}$ | 10.5 |
| | ② 200~1000 | 35 | $V=4.844 H^{1.4995}$ | 15.7 |
| | A ₃ | | | |
| | ① 1000~1700 | 9 | $V=1.395 H^{2.0370}$ | 10.5 |
| | ② 500~1000 | 27 | $V=1.492 H^{1.9317}$ | 12.3 |
| | ③ 200~ 500 | 8 | $V=2.469 H^{1.6914}$ | 19.6 |
| | A ₄ | | | |
| | ① 1000~1700 | 9 | $V=1.395 H^{2.0370}$ | 10.5 |
| | ② 700~1000 | 13 | $V=0.3543 H^{2.4604}$ | 10.3 |
| | ③ 500~ 700 | 14 | $V=1.876 H^{1.8483}$ | 14.1 |
| | ④ 200~ 500 | 8 | $V=2.469 H^{1.6914}$ | 19.6 |
| B $V=aH^bN^c$ | B ₁ 200~1000 | 35 | $V=0.05623 H^{2.1081} N^{0.4266}$ | 11.8 |
| | B ₂ | | | |
| | ① 500~1000 | 27 | $V=0.1544 H^{2.0564} N^{0.2943}$ | 11.6 |
| | ② 200~ 500 | 8 | $V=0.001548 H^{2.7541} N^{0.6993}$ | 14.6 |

$$V=aH^b$$

式の誤差率は大い。ここでは本数1本1本の判定が容易と考えられるから

$$V=aH^bN^c$$

式の適用が考えられる。

このあらかじめ行なった層の検討をもとに、91個の資料によって航空林分材積式を導いた。

得られた材積式とその残差の百分率誤差はつぎのとおりである。

本数 1,000~1,700 本/ha

$$\log V=0.261013+1.946349 \log H \quad (11.7\%)$$

本数 500~1,000 本/ha

$$\log V=0.330432+1.805230 \log H \quad (13.7\%)$$

本数 200~ 500 本/ha

$$\log V=-2.078778+2.472340 \log H+0.557726 \log N \quad (17.0\%)$$

$$\log V=0.464032+1.622153 \log H \quad (18.4\%)$$

ここで、本数 200~500 本/ha 層では全部の資料によって計算すると両式の精度にさほど差は認められない。そこで航空林分材積表には3層ともに

$$V=aH^b$$

式による計算結果を表示する。ただし 200~500 本/ha 層では、1本1本の本数測定を行なう場合も想定し、

$$V = aH^b N^c$$

式をあわせ記載する.

層化を行わず全体を

$$V = aH^b$$

式であらわした場合の誤差率は 18.1% となり, 層化の効果が認められる.

ところでこれら材積式の計算には地上実測樹高が用いられている. しかし地上実測樹高と写真測定樹高には差が認められることが III-1 で明らかとなった. さらに両者は一次の修正式で修正されることも明らかにした. そこでここでも両者の間に一次の修正式を導いた. また本数についても同じく修正式を導いた.

写真測定に使用した写真は 1966 年 10, 11 月, 林野庁撮影の山-455 (第 2 ニチナン) であり, その 2.5 倍引伸写真を使用した. 樹高は 10 回の測定の平均値を写真測定値とし, 地上実測平均樹高との間に回帰式を導いた. 本数は写真上 3 回くりかえして測定し, その平均値を写真測定値とした. 得られた修正式は

平均樹高

$$H = -0.417 + 1.0711 H'$$

(H : 修正された平均樹高, H' : 写真測定平均樹高)

ha あたり本数

$$N = 117.96 + 1.0164 N'$$

(N : 修正された ha あたり本数, N' : 写真測定 ha あたり本数)

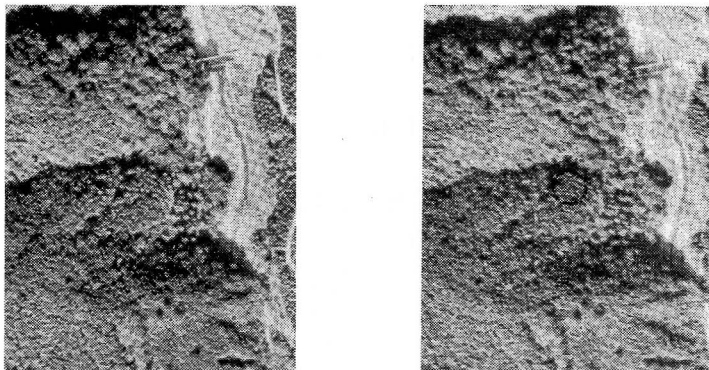
である.

航空林分材積表には写真上の測定値をそのまま使用できるように表示するが (修正済), 修正式をあわせ記載しておく. これにより, 写真測定にくせを持つ測定者もこの材積表を使うことが可能となる.

さらに本数層の判別のためにステレオグラムを附属させた. ステレオグラムはその上に

Tab. V-2 The aerial stand volume table for the even aged artificial stand of Sugi (*Cryptomeria japonica*) in Obi district.

No. 1 The table for 200~500 no./ha stands



Stereogram 480 no./ha Plot size=0.1 ha
(山-455, Photographed by Forestry Agency in 1966. 2.5 times enlarged.)

| | | | | | | | | | | |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| H (m) | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| V (m ³) | | | | | 235 | 261 | 288 | 316 | 345 | 375 |
| H (m) | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 |
| V (m ³) | 406 | 438 | 471 | 505 | 539 | 575 | | | | |

H : Stand height on photos.

V : Stand volume/ha

Note. 1. The regression equation based on the two variables.

$$\log V = -2.078778 + 2.472340 \log H + 0.557726 \log N$$

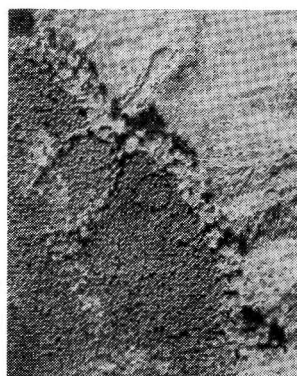
2. The regression equation used for correcting photo measurements of stand heights.

$$H = -0.417 + 1.0711 H'$$

H : Corrected height

H' : Height on photos

No. 2 The table for 500~1000 no./ha stands.



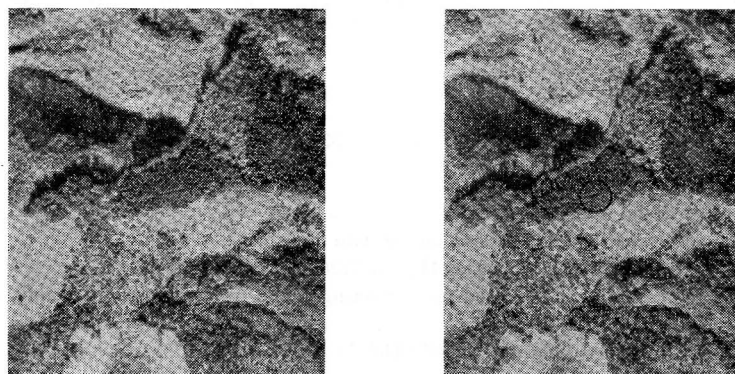
Stereogram 950 no./ha Plot size = 0.1 ha

| | | | | | | | | | | |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| H (m) | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| V (m ³) | 137 | 162 | 190 | 251 | 284 | 319 | 356 | 395 | 435 | 478 |
| H (m) | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 |
| V (m ³) | 522 | 567 | 615 | 664 | 715 | 767 | | | | |

ポケット立体鏡を立てて観察する倍率が、反射式立体鏡下で2.5倍引伸写真をみる倍率にほぼ等しくしておけばよいと考えた。ここで反射式立体鏡の倍率は通常3倍であり、ポケット立体鏡の倍率は3.5倍である。しかし両者にさほどの差は認められないので、2.5倍引伸写真を複写して附属させた。

以上の考え方に基づき作成された航空林分材積表を Tab. V-2 に示す。

No. 3 The table for 1000~1700 no./ha stands.



Stereogram 1660 no./ha Plot size=0.1 ha

| H (m) | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| V (m ³) | 161 | 194 | 230 | 310 | 355 | 402 | 453 | 506 | 562 | 621 |
| H (m) | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 |
| V (m ³) | 683 | | | | | | | | | |

V-3. 検 定

この材積表を正しく検定するためには新たな資料を必要とする。しかしここではそうした資料を持たないので、この材積表作成に使用した資料の一部によって、おおよその検討を行なった。

現地調査資料38個 (Tab. A. II-3 の No. 1~No. 39, ただし No. 34 を除く) について、得られた材積式と修正式を用いて材積の推定を行なった。この場合、平均樹高と ha あたり本数に、

- A. 写真測定値をそのまま用いる
 - B. 写真測定値を修正式で修正した値を用いる
 - C. 写真測定値のうち、樹高のみ修正式で修正した値を用いる
- という3つの場合をとりあげた。その結果を Tab. V-3 に示す。

いずれも比較的正確に材積の推定が行なわれていることがわかる。

Tab. V-3 Check of the aerial stand volume equations.

| | Actual volume | Volumes calculated by the equations. | | |
|--------------------------------|---------------|--------------------------------------|--------|--------|
| | | A | B | C |
| Total volume (m ³) | 12,448 | 11,420 | 13,154 | 12,336 |
| Mean volume (m ³) | 327.6 | 300.5 | 346.2 | 324.6 |
| Error (m ³) | | -27.1 | 18.6 | -3.0 |
| Percentage of error (%) | | -8.3 | 5.7 | -0.9 |

ここで地上実測材積と、得られた推定材積との有意差が認められるかどうかの検定を行なった。検定は、方法別に資料38個について、それぞれ実測値と推定値間の差を求め、0との間の有意差の検定を、有意水準5%で行なった。

$$t = \frac{|\bar{x}_i| - 0}{\sigma}$$

式で t 値を計算し、 t 表の値と比較して有意差をみた。その結果得られた t の値は

A : 2.48 *

B : 1.60

C : 0.26

となり、Aを除いて0との間に有意差が認められないことがわかった。Aにのみ有意差が認められ、B、Cに認められないことから、写真測定値の修正は有効と考えられる。この際、Cは樹高のみ修正した場合である。ここで有意差がみられないなら、本数の修正はあえて必要がないといえよう。

以上の検討より、樹高の修正を考慮済である筆者の材積表は、十分期待にかなう材積推定を可能とするものであると考える。

結 論

人工同齢林を対象に航空林分材積表に関する研究を行なった。その結果つぎの結論を得た。

人工同齢林を対象とする航空林分材積表として、つぎの航空林分材積式に基づき作成される航空林分材積表を適切なものとする。

(1) ha あたりの本数が少なく、写真上で立木本数が正確に測定できると考えられる林分を対象とする場合は

$$V = aH^b N^c$$

式を適用する。

(2) ha あたりの本数が多く、写真上個々の立木の判別が難しいと考えられる林分を対象とする場合は、本数を層化に用い、層化した各層において

$$V = aH^b \quad (\text{実用式 } V = a + bH)$$

式を適用する。

この場合、層の幅は本数の少ないところで狭く、多いところで広くする。また層の判定を容易にするため、ステレオグラムを附属させる。

この材積表は、つぎの諸点において従来の航空林分材積表に優るものであると信ずる。

- (i) 人工同齢林の材積表として普遍性が高いこと
- (ii) 精度的に高度なこと
- (iii) 写真上での測定因子は少なく、しかも簡単な測定しか要求されないため、使いやすい材積表であること
- (iv) 本材積表の特色である本数層化の考え方は、きわめて合理的なものであること

要 約

(1) 人工同齡林に関して、使いやすく、しかも高精度な航空林分材積表を見出すことが本研究の目的である。

(2) 航空林分材積表の作成は、航空林分材積式によって行なわれる。そこで航空林分材積式が検討されなければならない。

(3) 従来各地で種々の航空林分材積式が検討された。しかし普遍性のある材積式は見出されてない。

(4) 航空林分材積式は航空写真上で測定可能な因子のうち、材積と結びつきの強い因子によって理論的に導かれる必要がある。

(5) そこで林分材積を直接求める公式

$$V = FGH$$

式と、単木の集合としてとらえる

$$V = fG_b H$$

式によって、つぎの航空林分材積式を導いた。

(6) 本数が少なく、写真上で本数の測定が容易であると考えられる林分を対象とする場合

$$V = aH^b N^c$$

式を適用する。

本数が多く、写真上で本数測定が困難であると考えられる林分を対象とする場合は、本数は層化に用い、各層で

$$V = aH^b$$

式を適用する。

(7) 誘導された材積式に関して考察を行なった。

まず、独立因子とされる樹高、本数と林分材積との関係の強さを相関分析によりたしかめた。その結果、両因子が材積との結びつきが強く、材積式の独立因子として適切であることが明らかとなった。

(8) ロジスチック理論に基づく逆数式を用いて、層の幅について検討した。その結果、層の幅は、本数の多いところで広く、少ないところで狭くすればよいことがわかった。

(9) 材積式として実用上は

$$V = a + H^b$$

式にかえて

$$V = a + bH$$

式を用い得ることが判明した。

(10) 筆者の航空林分材積式が精度的に高いものであることを明らかにした。

(11) 独立因子の写真上での測定精度について検討した。

(12) その結果、林分平均樹高の測定誤差は、系統的誤差ではば -5%，偶然的誤差ではば 10% 程度であることがわかった。なお、系統的誤差は木の高さに影響される。大きい平均樹高を持つ林分では、大きい負の誤差、ならびに誤差率となる。

(13) 本数については、写真上での層の判定の正確さが問題となる。そこで層の判定を誤る確率について理論的に考えた。

層の判定を誤る確率を一定とすると、層の幅は、本数測定標準偏差の大きさによって左右されることを明らかにした。標準偏差が大きい場合、層の幅は広くしなければならない。

(14) 一般に本数が多くなると、写真上での本数測定標準偏差が大きくなると考えられる。したがって写真上での測定面からみても、筆者の層化方法は合理的であることがわかった。

(15) 層の判定を容易にするため、ステレオグラムを航空林分材積表に附属させた。

(16) 写真上での測定誤差と、航空林分材積式の誤差がともに航空林分材積表使用時の精度に影響を与える。この全誤差についてもふれた。

(17) 飢肥地方スギ人工林を対象に、本研究に基づく航空林分材積表を作成し、本研究の成果を明らかにした。

(18) 以上の検討より、筆者の航空林分材積表は、従来の航空林分材積表より優れたものであることを信ずる。

引用および参考文献

- 1) 石川善郎 (1967): 航空写真による材木蓄積調査研究の動向と問題点, 日林北支講, 16
- 2) Loetsch, F. and Haller, K. E. (1964): Forest inventory. vol. 1
- 3) 森林調査研究会 (編) (1965): 例解森林調査の実務
- 4) Spurr, S. H. (1960): Photogrammetry and photointerpretation
- 5) 中山博一 (1958): A study on forest survey from aerial photographs 名大演報, 1
- 6) 谷口信一 (1961): Forest inventory by aerial photographs 北大演報, 21. 1
- 7) 西谷和雄・野口和一 (1959): 航空林分材積表の作成について, 第69回, 日林講
- 8) 木梨謙吉 (1961): 航空写真材積推定の精度, 第71回, 日林講
- 9) 中曾根武夫 (1959): 青森営林局大畑施業実験林における森林調査. 特に写真材積表の調製について. 森林航測, 16
- 10) 金谷匡洋 (1963): スギ, ヒノキの林分写真材積表, 森林航測, 38
- 11) Prodan, M. (1965): Holzmesslehre
- 12) 片岡秀夫 (1959): 近代的森林調査法の実務
- 13) 四手井綱英 (編) (1963): アカマツ林の造成
- 14) 安藤 貴 (1968): 同齡單純林の密度管理に関する生態学的研究, 林試報, 210
- 15) 只木良也 (1963): 競争密度効果を基にした幹材積収獲予測, 林試報, 154
- 16) 吉良竜夫 (編) (1957): 密度, 競争, 生産, みやま
- 17) 吉良竜夫 (編) (1960): 生態学大系, 2. 植物生態学
- 18) 寺崎康正, 小坂淳一, 金豊太郎 (1964): 林分の構造と成長, 収獲に関する研究 (I) 林試報, 168
- 19) 中島 徹 (1966): 航空写真による新しい森林の調べ方
- 20) 吉田正男 (1930): 測樹学要論
- 21) 嶺 一三 (1956): 測樹
- 22) 日本林業技術協会 (編) (1970): 森林航測ハンドブック
- 23) 今永正明 (1968): スギ人工林に対する航空林分材積式の検討, 京府大演報, 12
- 24) 西沢正久 (1959): 森林測定法

- 25) 林野庁, 林業試験場 (1955): 熊本地方すぎ林分収穫表調製説明書
- 26) 吉田正男 (1928): 同齡單純林に於ける単木及林木の生長曲線に関する研究, 東大演報, 5
- 27) Nyyssönen, A. (1955): On the estimation of the growing stock from aerial photographs.
- 28) 今永正明 (1967): 視差測定桿による視差測定の精度に関する考察, 京府大演報, 11
- 29) 今永正明 (1967): 視差測定桿による孤立木の樹高測定精度について, 京府大学術報・農, 19
- 30) 今永正明 (1970): 航空写真上での樹高測定精度について, 山形農林学会報, 27
- 31) 梶原幹弘 (1966): 樹高曲線の誤差に関する実験的考察, 京府大演報, 10
- 32) 中島 徹 (1961): 森林航測概要
- 33) 吉田洋一・吉田正男 (編) (1965): 数表
- 34) 今永正明 (1969): スギ人工林に対する航空林分材積表の作成について, 京府大演報, 13
- 35) 梶原幹弘 (1965): 新しい立木材積表に関する研究
- 36) Meyer, H. A. and Worley, D. P. (1957): Volume determinations from aerial stand volume tables and their accuracy. *Journal of forestry*
- 37) Gingrich, S. F. and Meyer, H. A. (1955): Construction of an aerial stand volume table for upland oak. *Forest science*.
- 38) 岸根卓郎 (1969): 理論応用統計学
- 39) 近藤正巳 (1959): 林業技術のための推計学入門
- 40) 大隅真一他 (1971): 森林計測学

Summary

The purpose of this investigation is to find out the aerial stand volume table which can estimate easily the volume of even aged artificial stands on aerial photographs with high exactitude.

1. In order to construct this aerial stand volume table, it is important to research the aerial stand volume equation.

2. Various equations have been constructed and examined by many persons—Gingrich and Meyer (1955), Spurr (1960), Pope (1961), for example. But satisfying equations have not been discovered.

3. The aerial stand volume equation has to be constructed logically by the independent variables relating to the stand volume closely. In this case, of course, we can not use the variables unmeasurable on the photographs.

4. The stand volume can be obtained by the formula,

$$V=FGH$$

where

V=Stand volume per unit area

F=Stand form factor

G=Stand basal area per unit area

H=Mean stand height

Only the stand height H of the three independent variables in the stand volume regression can be directly measured on aerial photographs.

The form factor F and the basal area G must be substituted by the variables measurable on the photographs. On the F, it has been recognized that it is the function of stand height H in general (Fig. II -3). As to G, we can recognize the allometric relations between G and N, and also between G and H (Fig. II -2, Fig. II -4).

Therefore

$$G=\alpha N^{\beta}$$

or

$$G=\gamma H^{\delta}$$

Then the aerial stand volume equations, based on these relationships, are as follows ;

5. As for the stands with low density (the number of trees per hectare), we obtained the equation

$$V=aH^bN^c$$

On the other hand, as for the stands with high stand density (approx. more than 500 trees/ha), we should classify stands into several groups of them by the stand density and then apply the formula

$$V=aH^b$$

to each group respectively.

6. In order to examine how closely these independent variables and stand volume V are correlated, the simple correlation coefficients for the stand of Sugi (*Cryptomeria japonica* D. DON) in Obi district were

$$r_{V \cdot H} = 0.90 **$$

$$r_{V \cdot N} = -0.59 **$$

The partial correlation coefficients were

$$r_{VH \cdot NCC} = 0.92 **$$

$$r_{VN \cdot HCC} = 0.63 **$$

**=Significant at the 1 % level

cc=Crown closure

These high values of correlation coefficients were also found in other districts.

As a result, it proves that these two factors are good as the independent variables of the regression.

7. On the standard deviation about the regression, it has been known that it ranges from $\pm 29\%$ to $\pm 75\%$ (Loetsch-Haller, 1964).

While the author's equations show the values approx. less than 20% in each density class in almost every districts.

8. On the relation between the stand volume V and the stand density N on equivalent stand height, the reciprocal equation was found by Shinozaki and Kira (1956) and Ando (1968).

The equation was

$$\frac{1}{V} = a + b \left(\frac{1}{N} \right)$$

or

$$\left(V - \frac{1}{a} \right) = - \frac{\frac{b}{a^2}}{\left(N + \frac{b}{a} \right)}$$

9. To decide the range of density class, this relationship above mentioned are available. The range of density class are depended on the stand density. The more the stand density increases, the broader the density class should be taken (Fig. II-8). The density classes in Obi district, for instant, were

Class I . 200 to 500 trees/ha

Class II . 500 to 1,000 trees/ha

Class III . 1,000 to 1,700 trees/ha

10. On the decision of density class on aerial photographs, the probability of its failure can be obtained by the formula,

$$P(e) = \frac{\int_0^{\alpha} I(t) dt}{\int_0^{\alpha} dt}$$

$$= \frac{\int_0^{\alpha} I(t) dt}{\alpha}$$

where

$$I_i = \int_{-\infty}^{-t_i} \varphi(t) dt$$

$$\varphi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}}$$

$$\alpha = \frac{a}{\sigma}$$

σ = Standard deviation

a = Range of density class (Fig. III-1).

From these relationships, it is concluded that the more the standard deviation of estimating the stand density on the photographs increases, the broader the range of density class should be taken. The standard deviation becomes large by the increase of stand density. Therefore it proves that the way of classification mentioned in 9. is quite suitable.

11. The exactitude in measuring the height of trees on aerial photographs are summarized as follows ;

- 1) In general, we underestimate the height of trees on aerial photographs.
- 2) Systematic errors and its percentage are affected by the height of trees. Photo measurements result in slight overestimation on low stands, but underestimation on high stands.
- 3) The value of systematic error is approx. - 5 % for the dominant height of the stands.
- 4) The standard error of the equation is approx. 10% for the dominant height of the stands.

12. As the result of my research, the author constructed the aerial stand volume table for the artificial stands of Sugi in Obi district (Tab. V-2).

Ninety-one of 0.08 hectare plots were located on Sugi stands in this district. The diameter at breast height, the height of trees were measured in each plot on the ground. Then the equation called h-d curve was solved by the method of least squares. The total stem volume of each plot was then determined on the basis of the tree volume table, and converted into the stand volume per hectare. The stand height H was calculated by the formula

$$H = \sum h_i n_i / \sum n_i$$

We first classify all the plots measured into several groups of them by the stand density, and then apply the formula

$$V = aH^b$$

to each group respectively. The groups (density classes) taken were three.

And the least squares determinations of the regression coefficients a and b of

equation

$$V=aH^b$$

in each group were given below together with the percentage of the standard errors.

- (1) 1,000 to 1,700 trees/ha

$$\log V=0.261013+1.946349 \log H \text{ (11.7\%)}$$

- (2) 500 to 1,000 trees/ha

$$\log V=0.330432+1.805230 \log H \text{ (13.7\%)}$$

- (3) 200 to 500 trees/ha

$$\log V=0.464032+1.622153 \log H \text{ (18.4\%)}$$

On the third density class, we can also use the equation

$$\log V=-2.078778+2.472340 \log H+0.557726 \log N \text{ (17.0\%)}$$

Now the height H is ground measurements and the values measured on the photographs have to be corrected by the correlation between the former and the latter.

$$H=-0.417+1.0711 H'$$

where

H =Corrected height

H' =Photo height

was the equation obtained.

Furthermore, so as to estimate the number of trees per hectare for a stand in question directly on photographs, stereograms were set in volume table.

To examine the validity of the equations, thirty eight plots were elected. We calculated their volume by these equations and compared their values with the actual ones.

The estimates were very close approximations to the actual values. And the T-test between these differences and zero were not significant.

Then it is concluded that the author's aerial stand volume table is the superior one and practical to estimate the stand volumes on the aerial photographs.

Tab. A. II-1 Basal area G and basal area G_h *

| No. | Kumogahata | | Obi | | Yamaguni | | No. | G | G_h |
|-----|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----|--------------------|--------------------|
| | G | G_h | G | G_h | G | G_h | | | |
| | m ² /ha | m ² /ha | m ² /ha | m ² /ha | m ² /ha | m ² /ha | | m ² /ha | m ² /ha |
| 1 | 26.8 | 27.4 | 36.7 | 37.7 | 64.7 | 65.5 | 49 | 49.8 | 50.4 |
| 2 | 25.3 | 26.3 | 30.5 | 31.6 | 60.5 | 61.5 | 50 | 49.9 | 51.8 |
| 3 | 26.0 | 27.2 | 41.8 | 42.4 | 49.8 | 51.0 | 51 | 54.4 | 55.8 |
| 4 | 27.3 | 27.9 | 42.9 | 43.6 | 60.7 | 62.0 | 52 | 46.3 | 47.9 |
| 5 | 37.4 | 40.1 | 26.2 | 29.1 | 70.1 | 71.0 | 53 | 49.5 | 51.1 |
| 6 | 29.9 | 32.0 | 33.0 | 34.2 | 59.3 | 59.8 | 54 | 47.6 | 52.0 |
| 7 | 23.9 | 24.8 | 40.3 | 41.4 | 70.1 | 71.9 | 55 | 51.4 | 53.6 |
| 8 | 32.0 | 34.0 | 29.3 | 29.9 | 61.2 | 61.4 | 56 | 70.0 | 72.9 |
| 9 | 50.6 | 52.7 | 45.8 | 47.7 | 52.4 | 53.7 | 57 | 47.8 | 50.2 |
| 10 | 40.0 | 41.0 | 43.7 | 44.7 | 57.8 | 59.1 | 58 | 35.3 | 36.1 |
| 11 | 31.2 | 32.2 | 23.4 | 24.7 | 47.9 | 48.8 | 59 | 39.2 | 40.0 |
| 12 | 32.1 | 32.9 | 30.9 | 31.6 | 49.4 | 50.2 | 60 | 45.0 | 46.1 |
| 13 | 26.2 | 27.6 | 28.2 | 29.7 | 53.6 | 54.5 | 61 | 34.3 | 35.2 |
| 14 | 47.6 | 49.8 | 23.5 | 25.1 | 53.1 | 54.8 | 62 | 43.1 | 44.3 |
| 15 | 28.0 | 29.0 | 46.6 | 47.6 | 44.1 | 44.9 | 63 | 40.8 | 41.6 |
| 16 | 33.1 | 34.6 | 30.5 | 31.5 | 73.4 | 74.0 | 64 | 60.8 | 62.8 |
| 17 | 37.5 | 38.1 | 51.2 | 55.4 | 49.3 | 49.9 | 65 | 47.7 | 49.2 |
| 18 | 40.5 | 43.3 | 55.0 | 56.4 | 63.0 | 64.0 | 66 | 43.7 | 45.7 |
| 19 | 40.3 | 42.4 | 46.6 | 47.4 | 51.7 | 53.0 | 67 | 46.4 | 47.0 |
| 20 | 47.6 | 48.9 | 57.1 | 57.7 | 35.3 | 36.2 | 68 | 43.1 | 44.2 |
| 21 | 25.9 | 27.0 | 39.0 | 39.9 | 60.4 | 61.3 | 69 | 47.0 | 48.7 |
| 22 | 36.9 | 41.9 | 31.6 | 34.7 | 56.6 | 57.8 | 70 | 44.5 | 46.3 |
| 23 | 35.6 | 36.9 | 35.5 | 36.6 | 54.8 | 55.3 | 71 | 49.8 | 51.7 |
| 24 | 47.8 | 50.9 | 44.4 | 45.4 | 39.9 | 43.9 | 72 | 60.5 | 61.7 |
| 25 | 37.3 | 38.2 | 45.8 | 46.8 | 41.5 | 42.7 | 73 | 46.1 | 49.7 |
| 26 | 42.1 | 44.6 | 41.7 | 42.4 | 50.6 | 52.2 | 74 | 47.8 | 49.5 |
| 27 | 40.8 | 42.8 | 39.5 | 40.5 | 45.4 | 48.1 | 75 | 39.0 | 40.6 |
| 28 | 43.4 | 46.5 | 47.2 | 48.0 | 48.0 | 48.6 | 76 | 40.8 | 42.2 |
| 29 | 46.5 | 47.9 | 51.5 | 52.4 | 53.5 | 54.3 | 77 | 30.5 | 34.0 |
| 30 | 43.5 | 47.1 | 45.3 | 46.5 | 51.4 | 52.8 | 78 | 31.5 | 32.7 |
| 31 | 42.9 | 48.6 | 47.5 | 48.5 | 66.8 | 68.6 | 79 | 47.8 | 48.8 |
| 32 | 53.1 | 54.6 | 41.6 | 42.8 | 69.5 | 71.9 | 80 | 42.5 | 47.1 |
| 33 | 42.0 | 43.4 | 33.6 | 35.2 | 33.6 | 34.6 | 81 | 36.0 | 37.3 |
| 34 | 31.7 | 34.1 | 62.7 | 64.4 | 33.7 | 35.1 | 82 | 29.7 | 30.2 |
| 35 | 59.3 | 62.2 | 38.9 | 39.4 | 39.4 | 40.5 | 83 | 32.0 | 32.5 |
| 36 | 48.0 | 52.4 | 39.7 | 40.5 | 40.0 | 41.5 | 84 | 25.6 | 26.5 |
| 37 | 28.1 | 29.3 | 63.3 | 65.0 | 48.2 | 48.8 | 85 | 38.3 | 39.4 |
| 38 | 44.4 | 45.1 | 53.2 | 54.2 | 53.9 | 55.8 | 86 | 47.4 | 49.8 |
| 39 | 34.8 | 35.4 | 59.7 | 60.8 | 40.2 | 42.0 | 87 | 34.0 | 35.6 |
| 40 | 52.3 | 53.1 | 44.1 | 44.3 | 37.1 | 38.1 | | | |
| 41 | 70.0 | 71.4 | 49.0 | 49.3 | 52.8 | 53.5 | | | |
| 42 | 33.2 | 33.9 | 32.9 | 34.3 | 57.8 | 58.8 | | | |
| 43 | 38.1 | 38.7 | 53.1 | 53.8 | 48.3 | 50.2 | | | |
| 44 | 35.0 | 35.5 | 49.5 | 50.2 | 54.9 | 55.8 | | | |
| 45 | 37.5 | 41.9 | | | 50.8 | 52.4 | | | |
| 46 | 47.7 | 48.5 | | | 53.9 | 55.5 | | | |
| 47 | 47.0 | 47.8 | | | 29.2 | 30.3 | | | |
| 48 | 64.0 | 66.6 | | | 56.5 | 57.6 | | | |

$$* G_h = \frac{\pi}{4} \cdot \overline{d_h^2} \cdot N$$

$$\overline{d_h^2} = \frac{\sum h_i d_i^2}{\sum h_i}$$

Tab. A. II-2 Basic data (Kumogahata)

| No. | Age | Dominant tree | | | All tree |
|-----|-----|----------------|---------------------|-------------|----------------|
| | | Density no./ha | Mean crown diameter | Mean height | Volume/ha |
| | yr. | no. | m | m | m ³ |
| 1 | 23 | 2900 | 1.35 | 9.4 | 146 |
| 2 | 25 | 1720 | 1.73 | 10.4 | 157 |
| 3 | 25 | 1360 | 1.63 | 11.4 | 166 |
| 4 | 25 | 1080 | 1.41 | 11.4 | 185 |
| 5 | 27 | 1540 | 2.01 | 11.5 | 228 |
| 6 | 22 | 1680 | 1.26 | 11.8 | 211 |
| 7 | 25 | 780 | 2.03 | 12.8 | 157 |
| 8 | 30 | 940 | 2.33 | 14.1 | 240 |
| 9 | 23 | 1940 | 2.03 | 14.4 | 396 |
| 10 | 27 | 1140 | 2.00 | 14.6 | 296 |
| 11 | 28 | 980 | 2.11 | 14.7 | 236 |
| 12 | 30 | 1260 | 1.69 | 14.7 | 242 |
| 13 | 35 | 940 | 2.09 | 15.4 | 206 |
| 14 | 40 | 1240 | 2.57 | 15.6 | 370 |
| 15 | 35 | 880 | 2.09 | 15.7 | 229 |
| 16 | 33 | 740 | 2.71 | 16.4 | 271 |
| 17 | 28 | 840 | 2.29 | 16.5 | 308 |
| 18 | 40 | 800 | 2.51 | 16.9 | 348 |
| 19 | 35 | 820 | 2.39 | 17.1 | 341 |
| 20 | 35 | 1000 | 2.32 | 17.3 | 396 |
| 21 | 40 | 620 | 2.33 | 17.3 | 222 |
| 22 | 27 | 920 | 1.73 | 17.2 | 358 |
| 23 | 40 | 580 | 1.96 | 17.4 | 310 |
| 24 | 50 | 940 | 2.47 | 18.0 | 429 |
| 25 | 55 | 560 | 2.85 | 18.2 | 326 |
| 26 | 35 | 900 | 2.29 | 18.2 | 381 |
| 27 | 40 | 800 | 3.40 | 18.3 | 367 |
| 28 | 50 | 800 | 2.60 | 19.0 | 408 |
| 29 | 37 | 860 | 2.41 | 19.0 | 428 |
| 30 | 38 | 840 | 2.87 | 19.0 | 420 |
| 31 | 40 | 680 | 2.55 | 19.4 | 374 |
| 32 | 40 | 820 | 2.35 | 19.8 | 499 |
| 33 | 55 | 600 | 2.71 | 19.9 | 400 |
| 34 | 43 | 570 | 3.17 | 20.2 | 365 |
| 35 | 50 | 1020 | 2.22 | 20.2 | 586 |
| 36 | 50 | 660 | 3.31 | 20.4 | 492 |
| 37 | 60 | 460 | 2.48 | 21.0 | 282 |
| 38 | 45 | 680 | 2.60 | 21.1 | 438 |
| 39 | 45 | 440 | 2.95 | 21.5 | 351 |
| 40 | 40 | 740 | 2.61 | 21.9 | 531 |
| 41 | 60 | 860 | 2.64 | 22.5 | 747 |
| 42 | 60 | 320 | 3.57 | 22.5 | 349 |
| 43 | 45 | 400 | 3.11 | 23.5 | 412 |
| 44 | 50 | 420 | 2.81 | 23.7 | 385 |
| 45 | 60 | 440 | 2.81 | 23.9 | 455 |
| 46 | 50 | 660 | 3.27 | 23.9 | 526 |
| 47 | 55 | 480 | 3.77 | 24.1 | 522 |
| 48 | 65 | 660 | 2.98 | 27.3 | 812 |

Tab. A. II-3 Basic data (Obi)

| No. | Age | Crown Closure | Dominant tree | | | Suppressed tree | | All tree | | |
|-----|-----|---------------|---------------|---------|----------------|-----------------|----------------|-------------|---------|----------------|
| | | | Mean height | Per ha | | Per ha | | Mean height | Per ha | |
| | | | | Density | Volume | Density | Volume | | Density | Volume |
| | yr. | % | m | no. | m ³ | no. | m ³ | m | no. | m ³ |
| 1 | 34 | 81 | 15.1 | 700 | 268 | 30 | 2 | 14.9 | 730 | 270 |
| 2 | 34 | 73 | 12.1 | 610 | 184 | 140 | 7 | 11.6 | 750 | 191 |
| 3 | 40 | 77 | 18.2 | 450 | 339 | | | 18.2 | 450 | 339 |
| 4 | 40 | 81 | 16.5 | 710 | 335 | | | 16.5 | 710 | 335 |
| 5 | 32 | 73 | 12.7 | 830 | 183 | 120 | 3 | 12.0 | 950 | 186 |
| 6 | 29 | 75 | 11.5 | 1,250 | 203 | 230 | 9 | 11.0 | 1,480 | 212 |
| 7 | 33 | 80 | 15.3 | 860 | 304 | 90 | 3 | 14.5 | 950 | 307 |
| 8 | 34 | 69 | 14.3 | 700 | 210 | 110 | 5 | 13.4 | 810 | 215 |
| 9 | 42 | 75 | 15.8 | 1,080 | 363 | 110 | 11 | 15.5 | 1,190 | 374 |
| 10 | 34 | 76 | 16.2 | 800 | 339 | 10 | 0 | 16.1 | 810 | 339 |
| 11 | 29 | 72 | 8.7 | 1,590 | 117 | 70 | 1 | 8.6 | 1,660 | 118 |
| 12 | 29 | 73 | 12.0 | 1,230 | 202 | 120 | 3 | 11.6 | 1,350 | 205 |
| 13 | 30 | 76 | 10.3 | 1,200 | 159 | | | 10.3 | 1,200 | 159 |
| 14 | 30 | 71 | 9.7 | 1,260 | 127 | 40 | 2 | 9.7 | 1,300 | 129 |
| 15 | 56 | 78 | 15.2 | 840 | 338 | 40 | 5 | 15.1 | 880 | 343 |
| 16 | 55 | 76 | 16.0 | 540 | 232 | 90 | 3 | 14.8 | 630 | 235 |
| 17 | 56 | 64 | 22.1 | 300 | 495 | 10 | 1 | 21.6 | 310 | 496 |
| 18 | 47 | 76 | 17.5 | 590 | 428 | 50 | 5 | 17.0 | 640 | 433 |
| 19 | 46 | 76 | 21.3 | 540 | 442 | | | 21.3 | 540 | 442 |
| 20 | 44 | 70 | 20.1 | 600 | 505 | | | 20.1 | 600 | 505 |
| 21 | 44 | 69 | 15.4 | 910 | 297 | 40 | 3 | 15.1 | 950 | 300 |
| 22 | 39 | 70 | 14.6 | 750 | 242 | 10 | 1 | 14.5 | 760 | 243 |
| 23 | 54 | 86 | 16.0 | 640 | 274 | 40 | 3 | 15.8 | 680 | 277 |
| 24 | 54 | 79 | 16.8 | 650 | 347 | 40 | 4 | 16.5 | 690 | 351 |
| 25 | 46 | 75 | 16.5 | 600 | 346 | 10 | 0 | 16.3 | 610 | 346 |
| 26 | 55 | 64 | 15.7 | 510 | 297 | 70 | 10 | 15.5 | 580 | 307 |
| 27 | 55 | 68 | 22.7 | 240 | 372 | | | 22.7 | 240 | 372 |
| 28 | 40 | 80 | 16.4 | 910 | 374 | 20 | 0 | 16.3 | 930 | 374 |
| 29 | 40 | 78 | 15.3 | 1,090 | 384 | | | 15.3 | 1,090 | 384 |
| 30 | 58 | 74 | 15.6 | 740 | 334 | 40 | 6 | 15.5 | 780 | 340 |
| 31 | 38 | 75 | 17.6 | 1,200 | 414 | 40 | 6 | 17.5 | 1,240 | 420 |
| 32 | 46 | 74 | 17.2 | 730 | 342 | 20 | 4 | 17.1 | 750 | 346 |
| 33 | 40 | 76 | 15.5 | 700 | 258 | 100 | 11 | 15.0 | 800 | 269 |
| 34 | 55 | 64 | 27.2 | 290 | 705 | 20 | 4 | 26.0 | 310 | 709 |
| 35 | 40 | 86 | 22.2 | 310 | 369 | | | 22.2 | 310 | 369 |
| 36 | 55 | 65 | 19.6 | 460 | 348 | 20 | 2 | 19.5 | 480 | 350 |
| 37 | 51 | 84 | 19.7 | 630 | 550 | | | 19.7 | 630 | 550 |
| 38 | 51 | 79 | 21.5 | 390 | 483 | | | 21.5 | 390 | 483 |
| 39 | 52 | 64 | 21.2 | 440 | 532 | 10 | 2 | 21.1 | 450 | 534 |

Tab. A. II -4 Basic data (Yamaguni)

| No. | Age | Dominant tree | | | Suppressed tree | | All tree | | |
|-----|-----|---------------|---------|----------------|-----------------|----------------|-------------|----------|----------------|
| | | Mean height | Per ha | | Per ha | | Mean height | Per ha | |
| | | | Density | Volume | Density | Volume | | Detisity | Volume |
| | yr. | m | no. | m ³ | no. | m ³ | m | no. | m ³ |
| 1 | 48 | 25.7 | 660 | 719.8 | 70 | 51.1 | 25.5 | 730 | 771.0 |
| 2 | 48 | 24.3 | 750 | 676.5 | 30 | 18.3 | 24.3 | 780 | 694.8 |
| 3 | 28 | 17.7 | 1,080 | 339.0 | 100 | 22.1 | 17.6 | 1,180 | 361.1 |
| 4 | 28 | 13.1 | 1,300 | 239.9 | 10 | 3.1 | 13.1 | 1,310 | 243.0 |
| 5 | 40 | 17.7 | 1,070 | 436.1 | 40 | 13.5 | 17.7 | 1,110 | 449.6 |
| 6 | 52 | 20.8 | 860 | 480.8 | 50 | 21.4 | 20.7 | 910 | 502.2 |
| 7 | 60 | 24.0 | 630 | 675.6 | — | — | 24.0 | 630 | 675.6 |
| 8 | 52 | 25.5 | 710 | 784.4 | 50 | 47.1 | 25.5 | 760 | 831.5 |
| 9 | 48 | 25.1 | 560 | 640.6 | 50 | 41.5 | 25.0 | 610 | 682.1 |
| 10 | 48 | 22.1 | 730 | 690.7 | 40 | 25.9 | 22.0 | 770 | 716.6 |
| 11 | 52 | 22.4 | 740 | 629.8 | — | — | 22.4 | 740 | 629.8 |
| 12 | 51 | 21.5 | 590 | 521.0 | — | — | 21.5 | 590 | 521.0 |
| 13 | 55 | 21.9 | 710 | 591.8 | — | — | 21.9 | 710 | 591.8 |
| 14 | 47 | 19.6 | 1,170 | 550.8 | — | — | 19.6 | 1,170 | 550.8 |
| 15 | 45 | 19.9 | 890 | 460.1 | — | — | 19.9 | 890 | 460.1 |
| 16 | 48 | 22.5 | 660 | 523.7 | — | — | 22.5 | 660 | 523.7 |
| 17 | 57 | 26.8 | 470 | 604.0 | 70 | 60.6 | 26.6 | 540 | 664.6 |
| 18 | 46 | 23.3 | 760 | 598.8 | — | — | 23.3 | 760 | 598.8 |
| 19 | 44 | 22.7 | 600 | 473.5 | — | — | 22.7 | 600 | 473.5 |
| 20 | 56 | 23.2 | 750 | 741.0 | 40 | 39.4 | 23.2 | 790 | 780.4 |
| 21 | 40 | 22.2 | 740 | 505.1 | 30 | 14.7 | 22.2 | 770 | 519.8 |
| 22 | 40 | 22.9 | 760 | 674.8 | — | — | 22.9 | 760 | 674.8 |
| 23 | 28 | 14.2 | 1,440 | 333.1 | 60 | 10.3 | 14.1 | 1,500 | 343.4 |
| 24 | 28 | 17.2 | 1,280 | 451.9 | 40 | 5.5 | 17.1 | 1,320 | 457.4 |
| 25 | 14 | 8.5 | 2,420 | 151.9 | 120 | 2.8 | 8.4 | 2,540 | 154.7 |
| 26 | 14 | 8.0 | 2,440 | 115.1 | 120 | 2.8 | 8.0 | 2,560 | 117.9 |
| 27 | 28 | 15.1 | 1,460 | 379.5 | — | — | 15.1 | 1,460 | 379.5 |
| 28 | 32 | 16.8 | 1,380 | 448.8 | — | — | 16.8 | 1,380 | 448.8 |
| 29 | 15 | 9.8 | 2,720 | 161.7 | — | — | 9.8 | 2,720 | 161.7 |
| 30 | 15 | 8.4 | 2,520 | 113.0 | — | — | 8.4 | 2,520 | 113.0 |
| 31 | 40 | 22.0 | 850 | 522.8 | 80 | 26.9 | 21.8 | 930 | 549.7 |
| 32 | 34 | 16.7 | 980 | 293.2 | — | — | 16.7 | 980 | 293.2 |
| 33 | 24 | 12.0 | 1,260 | 165.6 | 180 | 11.2 | 11.8 | 1,440 | 176.8 |
| 34 | 37 | 18.5 | 930 | 468.5 | 100 | 23.3 | 18.3 | 1,030 | 491.8 |
| 35 | 40 | 22.6 | 790 | 610.1 | 80 | 29.2 | 22.4 | 870 | 639.3 |
| 36 | 28 | 14.9 | 1,740 | 370.7 | — | — | 14.9 | 1,740 | 370.7 |
| 37 | 37 | 23.7 | 740 | 542.5 | 200 | 98.6 | 23.4 | 940 | 641.1 |
| 38 | 46 | 20.9 | 660 | 450.3 | 140 | 83.5 | 20.8 | 800 | 533.7 |
| 39 | 41 | 19.1 | 850 | 392.3 | 300 | 64.2 | 18.4 | 1,150 | 456.5 |
| 40 | 43 | 21.3 | 550 | 339.7 | 300 | 53.3 | 18.9 | 850 | 393.0 |
| 41 | 41 | 21.9 | 870 | 523.1 | 160 | 50.0 | 21.5 | 1,030 | 573.1 |
| 42 | 39 | 20.3 | 880 | 414.4 | 210 | 47.0 | 19.9 | 1,090 | 461.4 |
| 43 | 36 | 18.3 | 1,160 | 409.8 | 230 | 34.3 | 17.8 | 1,390 | 444.1 |
| 44 | 37 | 15.6 | 1,090 | 335.5 | 330 | 26.2 | 14.5 | 1,420 | 361.7 |
| 45 | 35 | 20.2 | 960 | 463.9 | 190 | 44.5 | 19.7 | 1,150 | 508.4 |
| 46 | 20 | 12.4 | 1,860 | 219.8 | 300 | 20.6 | 12.2 | 2,160 | 240.4 |
| 47 | 21 | 13.2 | 1,940 | 285.4 | 480 | 31.6 | 12.7 | 2,420 | 317.1 |
| 48 | 51 | 23.3 | 1,000 | 730.6 | 150 | 56.5 | 22.8 | 1,150 | 787.1 |
| 49 | 42 | 19.2 | 840 | 387.9 | 220 | 60.8 | 18.6 | 1,060 | 448.7 |
| 50 | 42 | 21.8 | 580 | 391.4 | 100 | 40.2 | 21.5 | 680 | 431.6 |
| 51 | 42 | 22.1 | 750 | 493.8 | 120 | 43.1 | 21.8 | 870 | 536.9 |
| 52 | 43 | 19.9 | 660 | 356.6 | 330 | 69.5 | 18.6 | 990 | 426.1 |
| 53 | 29 | 14.4 | 1,050 | 250.5 | — | — | 14.4 | 1,050 | 250.5 |
| 54 | 29 | 15.8 | 1,010 | 302.3 | 10 | 0.7 | 15.8 | 1,020 | 303.0 |
| 55 | 55 | 21.8 | 730 | 479.6 | 40 | 18.2 | 21.8 | 770 | 497.8 |

| No. | Age | Dominant tree | | | Suppressed tree | | All tree | | |
|-----|-----|---------------|---------|----------------|-----------------|----------------|-------------|---------|----------------|
| | | Mean height | Per ha | | Per ha | | Mean height | Per ha | |
| | | | Density | Volume | Density | Volume | | Density | Volume |
| | yr. | m | no. | m ³ | no. | m ³ | m | no. | m ³ |
| 56 | 52 | 22.4 | 700 | 561.2 | — | — | 22.4 | 700 | 561.2 |
| 57 | 58 | 21.0 | 650 | 490.1 | 40 | 14.5 | 20.9 | 690 | 504.6 |
| 58 | 28 | 16.6 | 1,180 | 359.2 | 60 | 9.7 | 16.5 | 1,240 | 368.9 |
| 59 | 27 | 15.0 | 1,050 | 237.4 | 160 | 17.8 | 14.7 | 1,210 | 255.2 |
| 60 | 28 | 16.6 | 1,110 | 340.0 | 90 | 13.3 | 16.4 | 1,200 | 353.3 |
| 61 | 28 | 17.2 | 950 | 307.8 | 180 | 33.9 | 16.9 | 1,130 | 341.7 |
| 62 | 41 | 20.9 | 800 | 500.1 | 310 | 99.7 | 20.2 | 1,110 | 599.8 |
| 63 | 27 | 15.6 | 940 | 283.5 | 480 | 71.9 | 15.0 | 1,420 | 355.4 |
| 64 | 26 | 12.5 | 1,060 | 202.6 | 620 | 57.4 | 11.8 | 1,680 | 260.0 |
| 65 | 28 | 15.8 | 860 | 251.1 | 560 | 101.6 | 15.4 | 1,420 | 352.7 |
| 66 | 27 | 13.9 | 1,200 | 246.4 | 400 | 43.9 | 13.4 | 1,600 | 290.3 |
| 67 | 28 | 16.7 | 1,100 | 359.7 | 140 | 23.2 | 16.3 | 1,240 | 383.0 |
| 68 | 28 | 17.7 | 940 | 366.4 | 100 | 19.1 | 17.4 | 1,040 | 385.5 |
| 69 | 28 | 16.4 | 1,280 | 392.2 | 100 | 12.2 | 16.2 | 1,380 | 404.4 |
| 70 | 45 | 22.4 | 980 | 718.2 | — | — | 22.4 | 980 | 718.2 |
| 71 | 60 | 21.8 | 700 | 697.8 | — | — | 21.8 | 700 | 697.8 |
| 72 | 50 | 21.9 | 730 | 506.3 | 290 | 115.5 | 21.4 | 1,020 | 621.8 |
| 73 | 33 | 15.7 | 1,260 | 307.2 | 640 | 47.0 | 14.4 | 1,900 | 354.2 |
| 74 | 40 | 19.4 | 740 | 353.3 | 340 | 85.9 | 18.5 | 1,080 | 439.2 |
| 75 | 40 | 19.6 | 690 | 301.2 | 100 | 20.8 | 19.3 | 790 | 322.0 |
| 76 | 40 | 18.4 | 750 | 287.4 | 120 | 16.7 | 17.9 | 870 | 304.1 |
| 77 | 24 | 12.9 | 1,220 | 240.9 | 120 | 7.9 | 12.7 | 1,340 | 248.8 |
| 78 | 24 | 11.0 | 1,460 | 147.7 | 790 | 37.6 | 10.4 | 2,250 | 185.3 |
| 79 | 36 | 17.2 | 890 | 301.7 | 220 | 39.1 | 16.7 | 1,110 | 340.8 |
| 80 | 25 | 15.6 | 850 | 219.7 | 260 | 16.4 | 14.2 | 1,110 | 236.1 |
| 81 | 25 | 13.3 | 1,080 | 198.1 | 140 | 9.6 | 12.9 | 1,220 | 207.7 |
| 82 | 32 | 16.1 | 1,420 | 385.4 | — | — | 16.1 | 1,420 | 385.4 |
| 83 | 39 | 22.0 | 750 | 423.2 | 10 | 0.6 | 21.8 | 760 | 423.8 |
| 84 | 45 | 19.0 | 560 | 337.4 | 80 | 20.7 | 18.7 | 640 | 358.1 |
| 85 | 32 | 18.0 | 1,000 | 349.8 | 300 | 20.4 | 16.2 | 1,300 | 370.2 |
| 86 | 40 | 22.1 | 680 | 437.7 | 120 | 70.4 | 22.1 | 800 | 508.1 |
| 87 | 65 | 26.6 | 500 | 675.1 | — | — | 26.6 | 500 | 675.1 |

Tab. A. Ⅲ-1 Mean and coefficient of variation of errors in measuring the tree hight on air photos. (Single tree)

| No. | Interpreter Error Ground measurement | A | | B | | C | | D | | E | | F | | G | |
|-----|---|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| | | E | C | E | C | E | C | E | C | E | C | E | C | E | C |
| | m | m | % | m | % | m | % | m | % | m | % | m | % | m | % |
| 1 | 18.1 | -1.1 | 5.9 | -0.6 | 6.3 | -0.6 | 5.4 | 0.6 | 11.4 | -1.9 | 5.2 | -0.1 | 7.7 | -0.9 | 2.6 |
| 2 | 15.7 | 2.0 | 5.7 | 2.3 | 6.5 | 2.0 | 7.3 | 3.2 | 13.7 | 1.3 | 3.4 | 1.5 | 12.4 | 0.5 | 2.6 |
| 3 | 18.9 | -0.9 | 7.5 | 1.9 | 8.3 | 0.9 | 10.3 | -0.9 | 11.2 | -2.1 | 7.5 | 0.4 | 6.9 | 0.1 | 5.3 |
| 4 | 19.4 | 0.9 | 4.8 | 0.4 | 6.6 | 0.6 | 9.8 | -0.9 | 14.7 | -2.1 | 7.6 | 1.6 | 7.8 | 0.9 | 5.7 |
| 5 | 15.4 | -0.3 | 6.6 | -1.5 | 17.3 | 0.2 | 12.8 | -1.3 | 9.9 | -0.6 | 6.1 | -2.0 | 11.7 | 0.2 | 5.8 |
| 6 | 16.5 | 3.0 | 5.0 | 1.3 | 5.3 | 1.5 | 12.2 | 4.3 | 13.2 | 0.8 | 5.2 | -0.7 | 8.6 | 2.3 | 4.7 |
| 7 | 20.1 | 0.2 | 5.2 | -1.6 | 6.8 | -1.6 | 11.6 | -7.0 | 9.9 | -2.3 | 9.0 | -2.5 | 7.8 | -0.6 | 5.5 |
| 8 | 16.6 | 0.4 | 4.5 | 3.5 | 5.8 | 1.6 | 11.5 | 0.6 | 11.2 | 0.6 | 5.4 | 3.2 | 11.9 | 4.4 | 3.6 |
| 9 | 19.3 | 0.8 | 6.5 | 2.2 | 3.7 | 0.8 | 13.0 | 0.1 | 7.9 | -1.6 | 4.3 | 1.5 | 12.7 | 2.2 | 5.7 |
| 10 | 16.4 | 3.7 | 5.5 | 3.9 | 6.7 | 4.2 | 11.3 | 2.7 | 14.2 | 1.5 | 7.8 | 3.4 | 7.1 | 5.1 | 3.2 |
| 11 | 21.0 | 1.3 | 3.3 | 1.0 | 4.4 | 1.5 | 10.1 | -3.1 | 16.4 | -1.2 | 7.0 | 0.3 | 5.4 | 2.0 | 4.1 |
| 12 | 15.9 | 2.5 | 6.1 | 2.7 | 8.3 | 3.9 | 11.4 | 0.3 | 10.7 | 1.5 | 10.3 | 1.3 | 7.6 | 2.7 | 8.2 |
| 13 | 19.0 | 0.6 | 4.3 | 1.1 | 5.4 | 1.3 | 10.4 | -0.4 | 12.4 | 0.4 | 7.4 | 1.1 | 6.8 | -0.4 | 6.0 |
| 14 | 18.0 | 1.1 | 7.3 | 1.8 | 6.4 | 2.1 | 15.7 | 0.9 | 15.2 | 0.4 | 11.7 | 1.4 | 8.1 | 2.1 | 6.4 |
| 15 | 21.4 | -2.9 | 5.9 | -1.9 | 10.9 | -1.9 | 15.8 | -3.6 | 4.4 | -3.8 | 7.4 | -1.9 | 9.9 | -1.4 | 7.9 |
| 16 | 14.7 | 2.4 | 8.1 | 3.8 | 7.6 | 4.8 | 10.8 | 4.3 | 6.9 | -2.4 | 9.2 | -0.2 | 16.7 | 0 | 7.9 |
| 17 | 22.2 | -1.5 | 6.2 | 1.6 | 5.6 | 1.1 | 6.5 | -3.7 | 14.7 | -1.5 | 13.6 | 0.2 | 10.9 | 0.4 | 4.4 |
| 18 | 21.7 | -2.2 | 5.8 | -0.5 | 7.8 | -2.0 | 7.4 | -4.8 | 13.7 | -1.7 | 13.3 | -1.7 | 10.3 | 0 | 3.1 |
| 19 | 19.0 | -4.2 | 6.3 | -3.9 | 8.1 | -4.7 | 8.4 | -2.4 | 9.3 | -4.9 | 8.0 | -3.7 | 6.4 | -2.9 | 6.0 |
| 20 | 17.8 | -3.7 | 5.4 | -3.7 | 6.1 | -3.2 | 6.1 | -1.2 | 5.8 | -3.5 | 8.6 | -4.7 | 10.3 | -3.5 | 8.1 |
| 21 | 19.7 | -4.1 | 3.2 | -3.9 | 9.8 | -4.9 | 8.2 | -2.4 | 10.6 | -4.1 | 10.3 | -4.1 | 13.5 | -4.1 | 6.0 |
| 22 | 15.8 | 0.8 | 5.0 | 0.3 | 7.0 | 1.0 | 12.5 | 8.9 | 11.9 | -0.5 | 6.3 | -0.2 | 12.1 | -0.2 | 5.0 |
| 23 | 18.3 | -1.5 | 6.4 | -0.5 | 6.0 | -2.2 | 7.5 | -0.7 | 16.3 | -2.2 | 6.8 | -1.0 | 15.5 | -2.7 | 4.9 |
| 24 | 14.0 | 2.7 | 4.6 | 2.7 | 6.6 | 2.5 | 7.8 | 4.0 | 12.5 | 2.0 | 10.6 | 2.0 | 11.0 | 0.8 | 2.9 |
| 25 | 14.7 | -1.1 | 6.2 | -0.4 | 5.9 | -1.3 | 6.0 | 1.9 | 13.8 | -1.3 | 4.7 | -0.8 | 24.5 | -1.1 | 5.9 |
| 26 | 14.4 | -2.8 | 5.4 | -3.0 | 11.6 | -1.0 | 7.7 | 2.9 | 15.2 | -1.0 | 9.0 | -1.5 | 26.3 | -2.3 | 5.8 |
| 27 | 14.1 | -3.0 | 6.2 | -3.0 | 8.4 | -1.0 | 5.8 | 2.7 | 15.9 | -0.7 | 9.3 | -1.2 | 26.6 | -1.7 | 3.5 |
| 28 | 14.3 | -2.4 | 7.1 | -1.7 | 5.8 | -0.9 | 5.6 | 2.0 | 7.5 | -1.4 | 9.4 | -0.4 | 26.1 | -0.9 | 5.6 |
| 29 | 16.8 | 0.3 | 5.5 | -1.1 | 3.9 | 0.3 | 10.5 | 0.1 | 12.5 | -0.9 | 5.6 | -1.1 | 14.0 | -0.9 | 3.8 |
| 30 | 19.9 | -1.3 | 6.9 | -1.1 | 7.0 | -2.0 | 12.7 | -2.5 | 9.8 | -0.8 | 7.6 | -1.3 | 11.3 | -1.1 | 4.5 |
| 31 | 15.8 | 0.4 | 4.8 | 0.6 | 4.4 | -0.1 | 9.0 | 0.8 | 16.7 | -0.1 | 5.6 | -0.1 | 12.0 | -0.6 | 4.7 |
| 32 | 18.1 | -1.2 | 3.0 | -0.7 | 6.3 | -1.5 | 10.6 | 0 | 6.0 | -1.5 | 6.2 | -1.9 | 13.0 | -2.7 | 6.4 |
| 33 | 18.1 | -1.5 | 6.0 | -1.7 | 3.2 | -1.7 | 10.7 | -1.7 | 17.3 | -2.2 | 5.9 | -2.2 | 13.6 | -2.9 | 4.7 |
| 34 | 13.9 | 2.5 | 5.6 | 2.0 | 5.0 | 2.7 | 7.4 | 1.8 | 16.5 | 1.5 | 6.8 | 2.3 | 6.8 | 1.5 | 7.8 |
| 35 | 17.8 | 0.2 | 5.2 | -2.2 | 12.1 | -1.5 | 10.2 | -1.2 | 17.0 | -2.5 | 9.6 | -2.5 | 11.4 | -3.9 | 4.0 |
| 36 | 15.3 | 0.8 | 3.5 | -0.7 | 12.6 | 0 | 13.8 | 0 | 16.0 | -0.4 | 8.6 | 0.5 | 11.7 | -2.4 | 4.7 |
| 37 | 19.3 | -2.3 | 4.6 | -2.5 | 9.6 | -4.0 | 11.9 | -2.0 | 12.7 | -3.7 | 7.2 | -4.2 | 11.1 | -3.7 | 7.9 |
| 38 | 16.5 | -0.4 | 6.7 | -1.9 | 8.9 | -0.7 | 16.0 | -0.7 | 14.1 | -1.6 | 6.7 | -3.1 | 13.0 | -3.8 | 6.9 |
| 39 | 19.6 | -0.1 | 5.9 | -2.1 | 6.4 | -2.1 | 6.9 | -1.1 | 12.7 | -3.5 | 3.8 | -2.1 | 8.8 | -2.6 | 5.9 |
| 40 | 20.8 | -1.1 | 3.6 | -2.8 | 5.2 | -2.3 | 5.9 | -3.0 | 15.4 | -4.5 | 2.8 | -2.5 | 10.0 | -3.0 | 6.3 |

| No. | Interpreter Error Ground measurement | A | | B | | C | | D | | E | | F | | G | |
|-----|---|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| | | E | C | E | C | E | C | E | C | E | C | E | C | E | C |
| | m | m | % | m | % | m | % | m | % | m | % | m | % | m | % |
| 41 | 23.2 | -2.5 | 3.8 | -1.8 | 3.0 | -3.0 | 5.2 | -4.5 | 11.0 | -5.7 | 6.5 | -2.5 | 8.6 | -2.8 | 3.7 |
| 42 | 23.6 | -1.7 | 4.6 | -2.4 | 3.9 | -2.9 | 5.4 | -6.6 | 10.0 | -4.9 | 3.5 | -2.7 | 7.8 | -2.7 | 4.1 |
| 43 | 21.2 | -0.9 | 3.7 | -0.2 | 3.1 | -0.2 | 7.3 | -4.2 | 10.4 | -4.0 | 7.3 | -2.8 | 12.6 | -1.4 | 3.0 |
| 44 | 16.5 | -1.2 | 8.0 | -0.7 | 8.3 | 1.3 | 14.9 | -1.2 | 15.5 | -1.2 | 9.9 | -0.7 | 8.4 | -3.1 | 3.3 |
| 45 | 21.4 | -4.2 | 5.3 | -3.0 | 3.4 | -4.0 | 13.4 | -4.4 | 11.7 | -5.1 | 7.3 | -3.0 | 11.7 | -3.0 | 7.2 |
| 46 | 19.1 | -1.9 | 4.6 | -1.4 | 4.3 | -2.4 | 10.7 | -3.3 | 12.0 | -3.5 | 5.8 | -2.4 | 11.7 | -0.7 | 7.3 |
| 47 | 20.1 | -3.4 | 6.8 | -2.2 | 4.1 | -2.9 | 8.3 | -7.3 | 18.1 | -4.8 | 6.2 | -2.4 | 22.1 | -1.7 | 5.3 |
| 48 | 19.5 | -0.9 | 5.3 | -0.2 | 6.2 | -1.6 | 4.7 | -1.8 | 13.2 | -3.9 | 8.1 | -0.7 | 18.6 | 0.5 | 4.3 |
| 49 | 19.1 | -2.1 | 5.8 | -1.7 | 5.8 | -0.5 | 9.0 | -3.1 | 13.0 | -3.1 | 5.5 | -1.2 | 9.4 | -1.7 | 4.1 |
| 50 | 22.0 | -4.3 | 5.7 | -3.2 | 4.5 | -2.5 | 8.2 | -4.6 | 15.8 | -6.4 | 5.4 | -3.4 | 12.9 | -3.6 | 3.8 |
| 51 | 19.8 | -1.7 | 4.3 | -0.3 | 3.1 | -1.2 | 8.4 | -3.1 | 13.0 | -3.1 | 7.2 | -1.9 | 8.6 | -1.2 | 1.6 |
| 52 | 20.8 | -1.8 | 5.4 | -1.1 | 4.2 | -2.2 | 9.0 | -4.3 | 13.2 | -4.8 | 4.9 | -2.0 | 10.4 | -1.3 | 3.4 |
| 53 | 20.8 | -2.2 | 5.4 | -1.1 | 4.5 | -2.0 | 3.6 | -2.4 | 16.2 | -3.8 | 6.6 | -2.2 | 8.6 | -2.0 | 3.1 |
| 54 | 14.6 | 0.4 | 5.8 | 2.5 | 5.5 | 1.1 | 8.4 | 6.2 | 13.1 | -1.3 | 10.5 | 0.6 | 11.8 | -0.3 | 6.2 |
| 55 | 14.2 | 1.7 | 4.1 | 0.3 | 10.6 | 1.5 | 12.8 | 2.2 | 11.2 | -1.1 | 9.6 | -0.7 | 6.3 | 0.8 | 7.1 |
| 56 | 16.1 | 0.3 | 4.5 | -0.4 | 5.9 | -0.4 | 8.4 | 1.0 | 11.7 | -2.8 | 10.8 | -2.1 | 8.6 | -1.1 | 5.3 |
| 57 | 17.6 | -1.7 | 6.6 | -1.5 | 8.4 | -1.5 | 5.4 | 0.4 | 14.5 | -4.3 | 10.2 | -1.2 | 8.8 | -2.4 | 6.0 |
| 58 | 14.8 | 0.9 | 4.4 | -0.3 | 13.0 | 1.1 | 7.5 | 2.5 | 9.8 | -2.2 | 11.4 | -0.8 | 8.8 | -1.3 | 4.9 |
| 59 | 16.1 | -1.1 | 3.6 | -1.6 | 8.6 | -0.4 | 6.5 | 1.2 | 10.3 | -3.5 | 9.5 | -2.6 | 8.3 | -2.6 | 3.3 |

Tab. A. III-2 The stand height measurements on air photos.

| Kumogahata | | | | Obi | | |
|------------|-----------------------|-------------------|-------------------|-----|-----------------------|--------------------------------|
| No. | Ground measurement | Photo measurement | | No. | Ground measurement | Photo measurement Int. B |
| | | Int. A | Int. B | | | |
| 1 | 23.5 ^m | 24.1 ^m | 21.3 ^m | 1 | 20.3 ^m | 18.2 ^m |
| 2 | 21.1 | 23.2 | 22.0 | 2 | 18.0 | 14.2 |
| 3 | 23.3 | 25.4 | 23.4 | 3 | 18.7 | 15.4 |
| 4 | 20.2 | 18.5 | 17.7 | 4 | 19.3 | 16.7 |
| 5 | 24.1 | 21.0 | 20.0 | 5 | 16.8 | 18.7 |
| 6 | 14.1 | 12.4 | 12.4 | 6 | 14.4 | 12.9 |
| 7 | 23.9 | 20.7 | 23.5 | 7 | 14.8 | 13.2 |
| 8 | 23.9 | 21.1 | 21.5 | 8 | 15.1 | 14.1 |
| 9 | 13.4 | 12.5 | 12.9 | 9 | 12.1 | 12.1 |
| 10 | 15.8 | 14.7 | 17.4 | 10 | 18.2 | 18.3 |
| 11 | 16.5 | 15.0 | 15.6 | 11 | 16.5 | 16.6 |
| 12 | 14.7 | 14.3 | 15.2 | 12 | 12.7 | 14.5 |
| 13 | 18.5 | 16.1 | 18.8 | 13 | 11.5 | 11.6 |
| 14 | 19.0 | 16.1 | 16.2 | 14 | 15.3 | 17.2 |
| 15 | 14.7 | 14.4 | 12.9 | 15 | 14.3 | 13.7 |
| 16 | 17.3 | 14.7 | 15.4 | 16 | 15.8 | 15.1 |
| 17 | 15.4 | 13.1 | 15.3 | 17 | 16.2 | 15.1 |
| 18 | 17.3 | 15.2 | 16.3 | 18 | 8.7 | 9.1 |
| 19 | 17.1 | 16.1 | 15.8 | 19 | 12.0 | 10.7 |
| 20 | 21.0 | 19.0 | 19.4 | 20 | 10.3 | 9.4 |
| 21 | 27.3 | 24.1 | 25.4 | 21 | 9.7 | 11.0 |
| 22 | 27.5 | 24.2 | 25.0 | 22 | 15.2 | 14.7 |
| 23 | 20.5 | 17.8 | 21.4 | 23 | 16.0 | 14.7 |
| 24 | 20.2 | 17.6 | 17.5 | 24 | 22.1 | 18.2 |
| 25 | 23.7 | 24.1 | 22.1 | 25 | 20.1 | 19.4 |
| 26 | 19.0 | 18.1 | 17.4 | 26 | 18.3 | 16.1 |
| 27 | 12.8 | 13.7 | 13.4 | 27 | 17.5 | 16.1 |
| 28 | 17.4 | 19.7 | 15.9 | 28 | 21.3 | 16.2 |
| 29 | 17.2 | 19.3 | 16.5 | 29 | 20.1 | 19.9 |
| 30 | 20.5 | 22.8 | 18.0 | 30 | 15.4 | 16.0 |
| 31 | 19.8 | 22.3 | 18.9 | 31 | 14.6 | 15.8 |
| 32 | 19.5 | 21.2 | 20.7 | 32 | 16.0 | 14.8 |
| 33 | 21.5 | 24.1 | 21.8 | 33 | 16.8 | 14.7 |
| 34 | 23.9 | 25.2 | 24.0 | 34 | 16.5 | 15.2 |
| 35 | 19.0 | 20.4 | 18.9 | 35 | 15.7 | 14.8 |
| 36 | 21.5 | 21.8 | 21.0 | 36 | 22.7 | 21.2 |
| 37 | 18.3 | 17.9 | 16.8 | 37 | 16.4 | 16.5 |
| 38 | 16.4 | 17.6 | 15.3 | 38 | 15.3 | 17.6 |
| 39 | 20.4 | 19.1 | 18.9 | 39 | 15.6 | 14.7 |
| 40 | 16.9 | 15.8 | 16.2 | 40 | 17.6 | 16.6 |

| Kumogahata | | | | Obi | | |
|------------|-----------------------|-------------------|--------|-----|-----------------------|--------------------------------|
| No. | Ground measurement | Photo measurement | | No. | Ground measurement | Photo measurement Int. B |
| | | Int. A | Int. B | | | |
| 41 | 9.4 ^m | 8.6 ^m | | 41 | 19.0 ^m | 16.0 ^m |
| 42 | 10.4 | 9.4 | | 42 | 17.2 | 16.7 |
| 43 | 11.4 | 10.4 | | 43 | 15.5 | 15.3 |
| 44 | 11.4 | 9.8 | | 44 | 27.2 | 23.8 |
| 45 | 11.5 | 10.7 | | 45 | 22.2 | 19.7 |
| 46 | 11.8 | 13.2 | | 46 | 19.6 | 17.1 |
| 47 | 14.4 | 13.6 | | 47 | 19.7 | 18.7 |
| 48 | 14.6 | 15.2 | | 48 | 21.5 | 21.4 |
| 49 | 15.6 | 13.9 | | 49 | 21.2 | 20.4 |
| 50 | 15.7 | 14.2 | | | | |
| 51 | 18.0 | 18.0 | | | | |
| 52 | 18.2 | 16.7 | | | | |
| 53 | 18.2 | 17.4 | | | | |
| 54 | 19.0 | 19.0 | | | | |
| 55 | 20.9 | 19.8 | | | | |
| 56 | 19.4 | 18.1 | | | | |
| 57 | 19.9 | 17.1 | | | | |
| 58 | 21.9 | 19.9 | | | | |
| 59 | 22.2 | 21.5 | | | | |
| 60 | 22.5 | 20.3 | | | | |
| 61 | 22.5 | 21.9 | | | | |
| 62 | 22.6 | 23.5 | | | | |
| 63 | 26.7 | 25.0 | | | | |
| 64 | 27.4 | 25.5 | | | | |

Tab. A. III-3 The stand density measurements on air photos in Obi district.

| No. | Ground measurement | | Photo measurement |
|-----|--------------------|---------------|-------------------|
| | All tree | Dominant tree | |
| | no./ha | no./ha | no./ha |
| 1 | 730 | 700 | 630 |
| 2 | 750 | 610 | 520 |
| 3 | 450 | 450 | 470 |
| 4 | 710 | 710 | 770 |
| 5 | 950 | 830 | 490 |
| 6 | 1,480 | 1,250 | 1,080 |
| 7 | 950 | 860 | 810 |
| 8 | 810 | 700 | 590 |
| 9 | 1,190 | 1,080 | 810 |
| 10 | 810 | 800 | 750 |
| 11 | 1,660 | 1,590 | 1,480 |
| 12 | 1,350 | 1,230 | 1,110 |
| 13 | 1,200 | 1,200 | 970 |
| 14 | 1,300 | 1,260 | 1,240 |
| 15 | 880 | 840 | 700 |
| 16 | 630 | 540 | 470 |
| 17 | 310 | 300 | 230 |
| 18 | 640 | 590 | 340 |
| 19 | 540 | 540 | 670 |
| 20 | 600 | 600 | 610 |
| 21 | 950 | 910 | 560 |
| 22 | 760 | 750 | 770 |
| 23 | 680 | 640 | 410 |
| 24 | 690 | 650 | 550 |
| 25 | 610 | 600 | 630 |
| 26 | 580 | 510 | 420 |
| 27 | 240 | 240 | 230 |
| 28 | 930 | 910 | 1,090 |
| 29 | 1,090 | 1,090 | 1,020 |
| 30 | 780 | 740 | 490 |
| 31 | 1,240 | 1,200 | 1,130 |
| 32 | 750 | 730 | 610 |
| 33 | 800 | 700 | 530 |
| 34 | 310 | 290 | 220 |
| 35 | 310 | 310 | 400 |
| 36 | 480 | 460 | 420 |
| 37 | 630 | 630 | 530 |
| 38 | 390 | 390 | 400 |
| 39 | 450 | 440 | 440 |

Tab. A. V-1 Some basic data for the aerial stand volume table (*Cryptomeria japonica*) in Obi district.

| No. | Age | Dominant tree | | | Suppressed tree | | All tree | | |
|-----|-----|---------------|---------|----------------|-----------------|----------------|-------------|---------|----------------|
| | | Mean height | Per ha | | Per ha | | Mean height | Per ha | |
| | | | Density | Volume | Density | Volume | | Density | Volume |
| | yr. | m | no. | m ³ | no. | m ³ | m | no. | m ³ |
| 1 | 56 | 17.6 | 600 | 353 | | | 17.6 | 600 | 353 |
| 2 | 44 | 18.6 | 650 | 413 | | | 18.6 | 650 | 413 |
| 3 | 34 | 12.6 | 670 | 207 | 30 | 2 | 12.5 | 700 | 209 |
| 4 | 40 | 14.5 | 1,120 | 376 | 30 | 7 | 14.5 | 1,150 | 383 |
| 5 | 56 | 17.0 | 680 | 386 | | | 17.0 | 680 | 386 |
| 6 | 26 | | | | | | 15.3 | 700 | 296 |
| 7 | 34 | | | | | | 16.6 | 480 | 303 |
| 8 | 37 | | | | | | 11.1 | 600 | 141 |
| 9 | 37 | | | | | | 10.7 | 750 | 158 |
| 10 | 27 | | | | | | 9.6 | 1,250 | 163 |
| 11 | 33 | | | | | | 14.4 | 900 | 300 |
| 12 | 58 | | | | | | 21.5 | 550 | 628 |
| 13 | 48 | | | | | | 18.8 | 580 | 561 |
| 14 | 27 | | | | | | 11.2 | 1,130 | 213 |
| 15 | 27 | | | | | | 12.2 | 1,030 | 244 |
| 16 | 27 | | | | | | 12.1 | 700 | 169 |
| 17 | 35 | | | | | | 18.0 | 830 | 386 |
| 18 | 34 | | | | | | 19.4 | 600 | 478 |
| 19 | 28 | | | | | | 13.3 | 1,130 | 321 |
| 20 | 34 | | | | | | 11.9 | 930 | 218 |
| 21 | 34 | | | | | | 12.3 | 1,080 | 236 |
| 22 | 30 | | | | | | 11.6 | 1,300 | 261 |
| 23 | 29 | | | | | | 11.2 | 1,300 | 205 |
| 24 | 32 | | | | | | 10.7 | 1,450 | 194 |
| 25 | 30 | | | | | | 17.0 | 620 | 286 |
| 26 | 28 | | | | | | 15.0 | 900 | 266 |
| 27 | 28 | | | | | | 12.8 | 850 | 207 |
| 28 | 26 | | | | | | 12.0 | 1,050 | 183 |
| 29 | 29 | | | | | | 10.8 | 950 | 129 |
| 30 | 31 | | | | | | 12.0 | 1,020 | 240 |
| 31 | 32 | | | | | | 13.6 | 600 | 215 |
| 32 | 33 | | | | | | 12.7 | 750 | 205 |
| 33 | 32 | | | | | | 12.6 | 700 | 202 |
| 34 | 34 | | | | | | 11.2 | 970 | 166 |
| 35 | 39 | | | | | | 15.8 | 770 | 402 |
| 36 | 38 | | | | | | 17.8 | 470 | 267 |
| 37 | 37 | | | | | | 14.2 | 720 | 224 |
| 38 | 39 | | | | | | 11.1 | 1,400 | 182 |
| 39 | 41 | | | | | | 10.6 | 1,250 | 163 |
| 40 | 43 | | | | | | 22.3 | 560 | 470 |
| 41 | 41 | | | | | | 21.0 | 520 | 362 |
| 42 | 41 | | | | | | 14.0 | 970 | 276 |
| 43 | 50 | | | | | | 19.0 | 400 | 354 |
| 44 | 50 | | | | | | 17.8 | 510 | 342 |
| 45 | 50 | | | | | | 20.3 | 350 | 314 |
| 46 | 50 | | | | | | 18.2 | 370 | 278 |
| 47 | 49 | | | | | | 14.1 | 1,400 | 272 |
| 48 | 46 | | | | | | 17.3 | 450 | 268 |
| 49 | 49 | | | | | | 14.0 | 850 | 244 |
| 50 | 53 | | | | | | 18.2 | 400 | 408 |
| 51 | 52 | | | | | | 17.8 | 500 | 380 |
| 52 | 51 | | | | | | 17.4 | 480 | 262 |
| 53 | 57 | | | | | | 18.7 | 500 | 367 |